



Escola d'Enginyeria de Telecomunicació i
Aeroespacial de Castelldefels

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TREBALL FINAL DE GRAU

Títol: Modelització del comportament tèrmic dels condensadors

Titulació: Grau en Enginyeria d'Aeroports

Autor: Joan Pere Ponsetí Madaula

Director: Dr. Àngel Cuadras Tomàs

Data: Dimarts 4 de Juliol de 2017

Títol: Modelització del comportament tèrmic dels condensadors

Autor: Joan Pere Ponsetí Madaula

Director: Dr. Àngel Cuadras Tomàs

Data: Dimarts 4 de Juliol de 2017

Resum

Aquest projecte té com a objectiu l'anàlisi i la posterior modelització del comportament tèrmic d'elements electrònics, en particular, de condensadors. S'han estudiat diferents simulacions i casos on s'han tingut en compte variacions en els aspectes principals de geometria, propietats físiques, disposició del material, etc. També es plantejaran els casos en què es poden donar fallades del condensador i les seves causes.

En el primer capítol s'ha introduït la història, tipologia, estructura, funcionament, etc dels condensadors, així com també s'han presentat estudis anteriors relacionats amb la modelització tèrmica d'aquests aparells electrònics. També s'han disposat alguns apartats dedicats a l'exposició de la teoria que hi ha darrere la transferència de calor, les equacions diferencials (en concret, l'equació de la calor) i tot coneixement teòric necessari per a fer més comprensible el desenvolupament del projecte.

S'ha estudiat un model de dissipació interna de condensadors. Aquesta dissipació s'ha portat a terme seguint una estructura de capes internes de diferents materials, que componen els nuclis dels condensadors reals. S'han portat a terme també simulacions unidimensionals i bidimensionals en les que es considerava una discretització de l'espai radial i de la secció, respectivament. Pel cas de les simulacions bidimensionals s'ha trobat que les temperatures internes sempre han estat inferiors i que és, depenent de les dimensions del model, que s'assoleixen temperatures majors o menors. Aquest fet es discuteix en la secció de conclusions.

Title: Thermal behaviour modelling of capacitances

Author: Joan Pere Ponsetí Madaula

Director: Dr. Àngel Cuadras Tomàs

Date: Tuesday, 4th July 2017

Overview

This project aims to the analysis and later modelling of the thermal behaviour of electronic components such as capacitances. Several simulations have been studied and some variations regarding to main aspects such as geometry, physical properties, material arrangement, etc have been taken into account. Also, some theory about electric failures have been stated and the causes of these malfunctions.

In the first chapter, history, types, structure, performance, etc, of capacitors have been introduced, as well as some previous studies regarding to the thermal behaviour modelling of this kind of electronic components. Some sections have been also dedicated to the theoretical background behind heat transfer, differential equations (specifically the heat equation) and all knowledge needed to make the project more comprehensive.

A realistic model of layered-dissipated power has been developed. It has been carried out following this layered internal structure of different materials (composing the actual capacitors' cores). Unidimensional and bidimensional simulations have been done considering a space and time discretization. Bidimensional results have shown lower temperatures than the ones found in unidimensional simulations. This is discussed in the conclusions part.

The irreversibility of the capacitors' degradation has been concluded too, studying the entropy of the process.

DEDICATÒRIA

A la meva família,

i amics,

B. Cabrera

J. Herrera

A. Mas

E. Prat

A. Riera

A. Villalonga

Gràcies.

ÍNDIX DE CONTINGUT

INTRODUCCIÓ	1
CAPÍTOL 1. SECCIÓ TEÒRICA	3
1.1. ELS CONDENSADORS	3
1.1.1. El primer condensador	3
1.1.2. Estructura i funcionament del condensador	3
1.1.2.1. Estructura i fabricació dels condensadors [2]	3
1.1.2.2. Funcionament del condensador [3]	5
1.1.2.3. Càrrega i descàrrega de condensadors [3]	6
1.1.3. Propietats del condensador.....	7
1.1.3.1. Capacitat	7
1.1.3.2. Impedància (Reactància Capacitiva)	8
1.1.3.3. Energia emmagatzemada.....	8
1.1.3.4. Corrent de fuga	9
1.1.3.5. Resistència sèrie dels condensadors [5]	9
1.1.3.6. Tensió de ruptura.....	9
1.1.4. Tipus de condensadors	10
1.1.4.1. Condensadors de capacitat fixa	10
1.1.4.2. Condensadors de capacitat variable	11
1.1.4.3. Condensadors ajustables	11
1.1.5. La degradació dels condensadors	12
1.2. TERMODINÀMICA, ENTROPIA I TRANSFERÈNCIA DE CALOR	12
1.2.1. Llei Primera de la Termodinàmica	13
1.2.2. Llei Segona de la Termodinàmica	13
1.2.3. L'entropia, el desordre i els processos irreversibles.....	14
1.2.4. La transferència de la calor.....	14
1.2.4.1. Advecció.....	14
1.2.4.2. Conducció.....	14
1.2.4.3. Convecció	15
1.2.5. Magnituds físiques en la transferència de calor	15
1.2.5.1. Conductivitat tèrmica	16
1.2.5.2. Calor específica	16
1.3. ESTUDIS PREVIS	17
1.3.1. Thermal Modeling of Aluminum Electrolytic Capacitors [12].....	17
1.3.2. Estudi de l'envelliment de sistemes electrònics [13].....	18
CAPÍTOL 2. MATERIALS I MÈTODES.....	21
2.1. CARACTERÍSTIQUES DELS CONDENSADORS ESTUDIATS	21
2.2. ARXIU DE DADES.....	22
2.3. L'EQUACIÓ DIFERENCIAL.....	23
2.3.1. L'equació diferencial parcial (PDE)	23
2.3.1.1. Equacions diferencials parcials de primer grau.....	24
2.3.1.2. Equacions diferencials parcials de segon grau	24
2.3.1.3. Condicions inicials i condicions de contorn.....	25

2.3.2. L'equació de la calor	25
2.4. MÈTODE D'ELEMENTS FINITS (MEF)	27
2.4.1. Conceptes bàsics.....	27
2.5. SIMULACIONS MATLAB I TEORIA DE FALLADES.	28
2.5.1. Dissipació de la potència dins del condensador	30
2.5.1. Simulacions unidimensionals (1D)	30
2.5.1.1. La funció MATLAB "pdepe"	31
2.5.1.2. Definició dels paràmetres	32
2.5.1.4. Procediment de codi MATLAB - Condensador MULTICAPA.....	34
2.5.2. Simulacions bidimensionals (2D)	35
2.5.2.1. La funció MATLAB "solvepde"	36
2.5.2.2. Procediment de codi MATLAB – CONDENSADOR MULTICAPA	36
2.5.3. Teoria de fallades	38
2.5.3.1. Fallades catastròfiques	38
2.5.3.2. Fallades per degradació amb el temps	38
CAPÍTOL 3. RESULTATS	41
3.1. REPRESENTACIÓ DE LES DADES D'ENTRADA	41
3.2. RESULTATS DE LES SIMULACIONS UNIDIMENSIONALS (1D).....	43
3.2.1. Resultats del model multicapa (1D).....	43
3.2.1.1 Tensió aplicada de $V_{cc} = 25 \text{ V}$	43
3.2.1.2 Tensió aplicada de $V_{cc} = 30 \text{ V}$	44
3.2.1.3 Tensió aplicada de $V_{cc} = 35 \text{ V}$	45
3.2.1.4 Tensió aplicada de $V_{cc} = 40 \text{ V}$	46
3.2.1. Comparació de resultats del model multicapa.	47
3.3. RESULTATS DE LES SIMULACIONS BIDIMENSIONALS (2D).....	48
3.3.1. Resultats del model multicapa (2D).....	48
3.3.1.1 Tensió aplicada de $V_{cc} = 25 \text{ V}$	49
3.3.1.2 Tensió aplicada de $V_{cc} = 30 \text{ V}$	51
3.3.1.3 Tensió aplicada de $V_{cc} = 35 \text{ V}$	52
3.3.1.4 Tensió aplicada de $V_{cc} = 40 \text{ V}$	53
3.4. RESULTATS D'ENTROPIA	54
CAPÍTOL 4. CONCLUSIONS	61
CAPÍTOL 5. ESTUDIS FUTURS	63
CAPÍTOL 6. BIBLIOGRAFIA I REFERÈNCIES	65
ANNEX A. CODI MATLAB	67
ANNEX A.1. CODI MATLAB – MODEL 1D	68
ANNEX A.2. CODI MATLAB – MODEL 1D	75
(COMPARATIVA DE RESULTATS)	75
ANNEX A.3. CODI MATLAB – MODEL 2D	81

ÍNDEX DE FIGURES

FIGURA 1.1. AMPOLLA DE LEYDEN [1]	3
FIGURA 1.2. ESQUEMA D'UN CONDENSADOR ELECTROLÍTIC D'ALUMINI [2]	4
FIGURA 1.3. FABRICACIÓ DELS CONDENSADORES [2]	5
FIGURA 1.4. PRINCIPI DE CÀRREGA D'UN CONDENSADOR [3].....	6
FIGURA 1.5(A). CÀRREGA [3] FIGURA 1.5(B). DESCÀRREGA [3].....	6
FIGURA 1.6. SUBCLASSIFICACIÓ DELS CONDENSADORS DE CAPACITAT FIXA. [4]	11
FIGURA 1.7. CONDENSADOR CATASTRÒFICAMENT DEGRADAT.	12
FIGURA 1.8. RESULTATS OBTINGUTS EN L'ESTUDI PREVI.....	18
FIGURA 2.1. TIPOLOGIA DE CONDENSADOR ANALITZAT.....	21
FIGURA 2.2. CAPTURA DEL FORMAT DE DADES EXCEL.....	22
FIGURA 2.3. MALLAT (ESQUERRA) DEL DOMINI I SOLUCIÓ NUMÈRICA DEL PROBLEMA (DRETA)	28
FIGURA 2.4. ESQUEMA DEL CONDENSADOR MULTICAPA	29
FIGURA 2.5. GEOMETRIA I MALLAT DE LA SECCIÓ PER A LA RESOLUCIÓ DE LA PDE	29
FIGURA 2.6. ESQUEMA INTERN DEL CONDENSADOR MULTICAPA.....	35
FIGURA 2.7. ESQUEMA DE FALLADES DELS CONDENSADORS ELECTROLÍTICS.....	39
FIGURA 3.1. COMPARACIÓ DE DADES DE POTÈNCIA INJECTADA I TEMPERATURA MESURADA A LA SUPERFÍCIE.....	42
FIGURA 3.2. PERFIL DE TEMPERATURES INTERNA I EXTERNA A LA TENSÍO DE $V_{CC}=25\text{ V}$	43
FIGURA 3.3. PERFIL DE TEMPERATURES RADIAL EN INSTANT DE TEMPERATURA MÀXIMA ($V_{CC}=25\text{ V}$)	44
FIGURA 3.4. PERFIL DE TEMPERATURES INTERNA I EXTERNA A LA TENSÍO DE $V_{CC}=30\text{ V}$	45
FIGURA 3.5. PERFIL DE TEMPERATURES RADIAL EN INSTANT DE TEMPERATURA MÀXIMA ($V_{CC}=30\text{ V}$)	45
FIGURA 3.6. PERFIL DE TEMPERATURES INTERNA I EXTERNA A LA TENSÍO DE $V_{CC}=35\text{ V}$	46
FIGURA 3.7. PERFIL DE TEMPERATURES RADIAL EN INSTANT DE TEMPERATURA MÀXIMA ($V_{CC}=35\text{ V}$)	46
FIGURA 3.8. PERFIL DE TEMPERATURES INTERNA I EXTERNA A LA TENSÍO DE $V_{CC}=35\text{ V}$	47
FIGURA 3.9. PERFIL DE TEMPERATURES RADIAL EN INSTANT DE TEMPERATURA MÀXIMA ($V_{CC}=35\text{ V}$)	47
FIGURA 3.10. TEMPERATURES MÀXIMES ENVERS TENSIONS APLICADES	48
FIGURA 3.11. TEMPERATURES EN LA SECCIÓ PER AL CONDENSADOR A 25 V (2D).	49
FIGURA 3.12. TEMPERATURES EN LA SECCIÓ PER AL CONDENSADOR A 25 V (3D).	50
FIGURA 3.13. TEMPERATURES EN LA SECCIÓ PER AL CONDENSADOR A 30 V	51
FIGURA 3.14. TEMPERATURES EN LA SECCIÓ PER AL CONDENSADOR A 35 V	52
FIGURA 3.15. TEMPERATURES EN LA SECCIÓ PER AL CONDENSADOR A 40 V	53
FIGURA 3.16. RESULTATS DE SRATE PER A $V_{CC}=25\text{ V}$	54
FIGURA 3.17. RESULTATS DE SRATE PER A $V_{CC}=30\text{ V}$	55
FIGURA 3.18. RESULTATS DE SRATE PER A $V_{CC}=35\text{ V}$	55
FIGURA 3.19. RESULTATS DE SRATE PER A $V_{CC}=40\text{ V}$	56
FIGURA 3.20. RESULTATS DE SRATE GLOBAL PER A $V_{CC}=25\text{ V}$	57
FIGURA 3.21. RESULTATS DE SRATE GLOBAL PER A $V_{CC}=30\text{ V}$	57

FIGURA 3.22. RESULTATS DE SRATE GLOBAL PER A $V_{CC}=35\text{ V}$	58
FIGURA 3.23. RESULTATS DE SRATE GLOBAL PER A $V_{CC}=40\text{ V}$	58

ÍNDIX DE TAULES

TAULA 1.1. TENSIONS DE RUPTURA DE DIVERSOS TIPUS DE CONDENSADORS	10
TAULA 1.2. CONDUCTIVITATS TÈRMiques MESURADES	17
TAULA 2.1. GEOMETRIA I TENSió DE RUPTURA DELS CONDENSADORS	21
TAULA 2.2. MAGNITUDS DE L'EQUACió.....	26
TAULA 2.3. RELACió DE PARÀMETRES	31
TAULA 2.4. ARGUMENTS DE LA FUNCió PDEPE	32
TAULA 2.5. PROPIETATS DELS MATERIALS.....	33
TAULA 2.6 COMPARACió DE PARÀMETRES EN LES EQUACIONS 24 I 26.....	34

INTRODUCCIÓ

La finalitat d'aquest treball és l'estudi de la transferència de calor en condensadors a partir de simulacions via software. El programari que s'ha fet servir és Matlab, una eina molt estesa per a treballs d'aquests tipus, on es precisa de la capacitat de computació per a resoldre els problemes que es plantegin. En aquest cas, l'eina matemàtica que s'ha utilitzat han estat les equacions diferencials parcials, d'ara endavant PDE (de les sigles en anglès *Partial Differential Equations*), partint del format general i particularitzant-lo pel cas de l'equació de la calor.

Una de les motivacions per la que es fa aquest projecte és la d'obrir els coneixements cap a un dels camps al que no m'he dedicat tant, i així aconseguir tenir una visió més ampla del que és l'enginyeria. Els objectius són millorar la capacitat d'anàlisi, contrastar els resultats obtinguts amb aquells que s'esperaven i comprovar les meves capacitats per adaptar-me a nous mètodes i àrees tècniques que fins ara no havia desenvolupat del tot. Tot això passa per l'objectiu principal del projecte que és l'anàlisi i modelat del comportament tèrmic i degradació dels aparells electrònics, en concret de condensadors.

Una de les conclusions que s'ha pogut extreure de la realització d'aquest projecte és que tot procés en aquesta vida té el seu sacrifici. L'anàlisi tèrmic que s'ha estudiat al llarg d'aquestes pàgines dóna una lleugera idea del complicat que és avui dia, en el món de la tecnologia, l'aplicació de nous sistemes sense haver-ne fet un previ estudi del seu comportament sota qualsevol condició. La temperatura dels sistemes juga un paper molt important en la vida útil dels aparells. Si s'ha portat a terme un exhaustiu estudi de com un sistema, o màquina, es pot comportar al llarg del temps, en funció de qualsevol variable, llavors, i només llavors, s'aconseguirà el major rendiment d'aquest.

Per a un bon enteniment de la matèria que es tractarà en aquest projecte, s'ha dividit en sis capítols, i cadascun presenta un aspecte del treball, com és la teoria que hi ha al darrere del projecte, els mètodes usats, etc. El capítol primer presenta els coneixements teòrics que han estat necessaris per a realitzar el treball. S'introdueixen els condensadors i les seves propietats, així com les lleis de la termodinàmica que expliquen i descriuen l'estat de la matèria. En el segon capítol es presenten els materials que s'han fet servir, així com els mètodes que s'han usat per a resoldre els problemes. Aquí s'introduiran les equacions diferencials i el programari Matlab. La finalitat del codi informàtic és simular la transferència de la temperatura en la secció del condensador, un primer apartat de transferència en 1D (radial) i un segon en 2D (secció del condensador).

Aquests resultats es trobaran resolent les equacions diferencials a partir d'unes condicions inicials i condicions de contorn que vénen donades de la mesura de la temperatura a l'exterior dels condensadors. Després, mitjançant Matlab, es faran les simulacions pertinents amb un codi específic per extreure aquestes dades i analitzar-les. Un cop fetes totes les simulacions, en el capítol tres es

presenten els resultats i s'avaluaran, tot comparant-los amb els resultats que s'esperen del comportament tèrmic dels aparells. Tot seguit es mostraran les conclusions, en el capítol quart, a què s'han arribat justificant tant els encerts com els errors que s'hagin pogut cometre. Seguidament, en el capítol cinquè s'aproparà l'estudi realitzat a les aplicacions que aquest pugui tenir en un futur.

La rellevància del projecte també es discutirà de cara a estudis futurs que puguin seguir en la línia d'investigació del comportament de components electrònics i la seva millora per a una major eficiència. I per acabar, en el sisè capítol, es presenta un llistat de referències i bibliografia a què s'ha acudit per a desenvolupar el projecte.

CAPÍTOL 1. SECCIÓ TEÒRICA

1.1. ELS CONDENSADORS

1.1.1. El primer condensador

El primer condensador de la història el van inventar simultàniament dos físics en el mateix any 1745 en dos països diferents: Pieter van Musschenbroek, de nacionalitat holandesa, a la Universitat de Leide, situada prop de la ciutat d'Àmsterdam i Edwald Georg von Kleist, a Alemanya [1].

En un principi, el condensador es composava d'una ampolla de vidre plena d'aigua i una tapa travessada per un clau en contacte amb l'aigua. Per aquest motiu se'l va anomenar "Ampolla de Leyden", en al·lusió a la universitat on es va crear. En 1747 John Bevis, físic i astrònom anglès, va eliminar l'aigua i revestí l'ampolla amb dos capes de paper d'alumini, una interna i una altra externa. Ambdues capes quedaven separades equidistantment pel propi vidre de l'ampolla, que a la vegada feia funció d'aïllant. La figura 1.1. mostra un esquema d'aquest aparell.

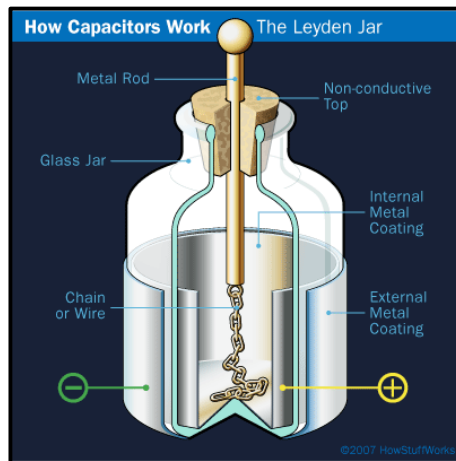


Figura 1.1. Ampolla de Leyden [1]

1.1.2. Estructura i funcionament del condensador

1.1.2.1. Estructura i fabricació dels condensadors [2]

La propietat fonamental d'un condensador és acumular càrregues elèctriques. La seva estructura més simple consta de dos làmines metàl·liques

anomenades armadures, una davant l'altra separades una distància d , per un material aïllant o dielèctric, que pot ser aire, paper, ceràmica, etc.

L'estructura interna es pot observar en la figura 1.2. en aquesta mateixa pàgina. Les armadures d'un condensador (*"Anode aluminum foil"* i *"Cathode aluminum foil"*) poden tenir forma quadrada, esfèrica, o formades per tires metàl·liques enrotllades i separades pel dielèctric (*"Paper spacer impregnated with electrolyte"*). Per a construir un condensador és suficient amb enfrontar aquestes armadures i mantenir-les separades de tal manera que entre elles hi hagi un espai lliure d'aire (o dielèctric), sense que s'arribin a tocar. Finalment, a cada xapa li connectem un terminal de fil conductor de corrent (*"Terminal leads"*), per obtenir, com a resultat, un condensador.

La diferència de tensió que apareix entre terminals, en connectar el condensador, és la responsable de que aquest es carregui fins arribar a la seva capacitat. Depenent de les característiques constructives del condensador, aquest pot tenir més o menys capacitat d'adquirir càrrega elèctrica. A la part inferior del condensador es col·loca un segellant de goma (*"Rubber sealing"*) per a donar estanquitat al condensador, juntament amb la capa aïllant (*"Insulating sleeve"*).

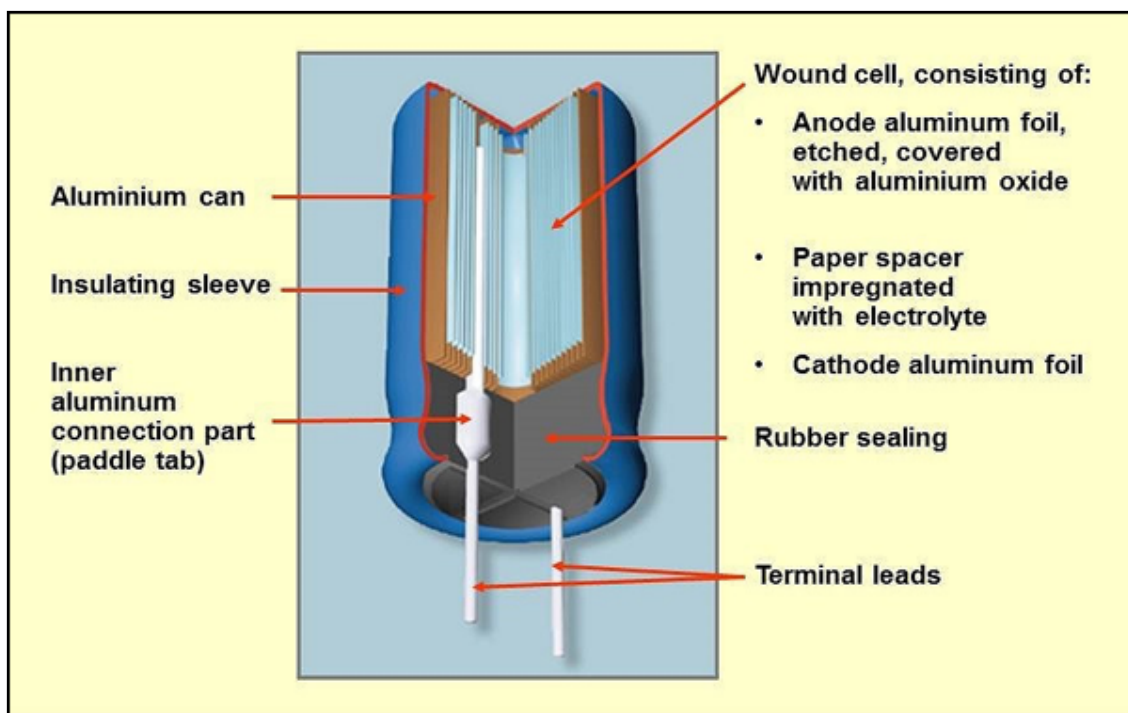


Figura 1.2. Esquema d'un condensador electrolític d'alumini [2]

En la figura 1.2. també s'observa l'enrotllat del material conductor, en aquest cas alumini, i material dielèctric, òxid d'alumini (Al_2O_3). Es veuen també els terminals i la capa aïllant externa. També s'incorpora una làmina de paper xop en electròlit entre les armadures.

En la figura 1.3. en aquesta pàgina es mostra el diagrama de la fabricació del condensador electrolític d'alumini. Es dóna una idea clara del procés de fabricació dels condensadors del tipus Alumini-Paper. A partir de grans bobines d'alumini s'arriba a obtenir, mitjançant el procés industrial anomenat "laminat" ("1.Foil slitting") les làmines de l'ordre de micres de gruix. És el moment d connectar els terminals al que seran l'ànode i el càtode del condensador ("2.Terminal welding") per a poder ja donar-los forma i bobinar-los ("3.Wind") juntament amb la capa de paper per a obtenir la secció final bobinada ("4.Winding section"). És ara quan se submergeix el conjunt en l'electròlit per a obtenir la capa de dielèctric entre les armadures ("5.Impregnation"). La part interna del condensador ja està enllestida i es disposa a afegir-hi el segellant de goma de la part inferior i la carcassa externa ("6. Assembly" – "7.Sealing"). Finalment es donen els processos per a comprovar el correcte funcionament del condensador ("9.Post-forming" – "10.100% testing,taping") i disposar-los per a la posterior venda i/o utilització.

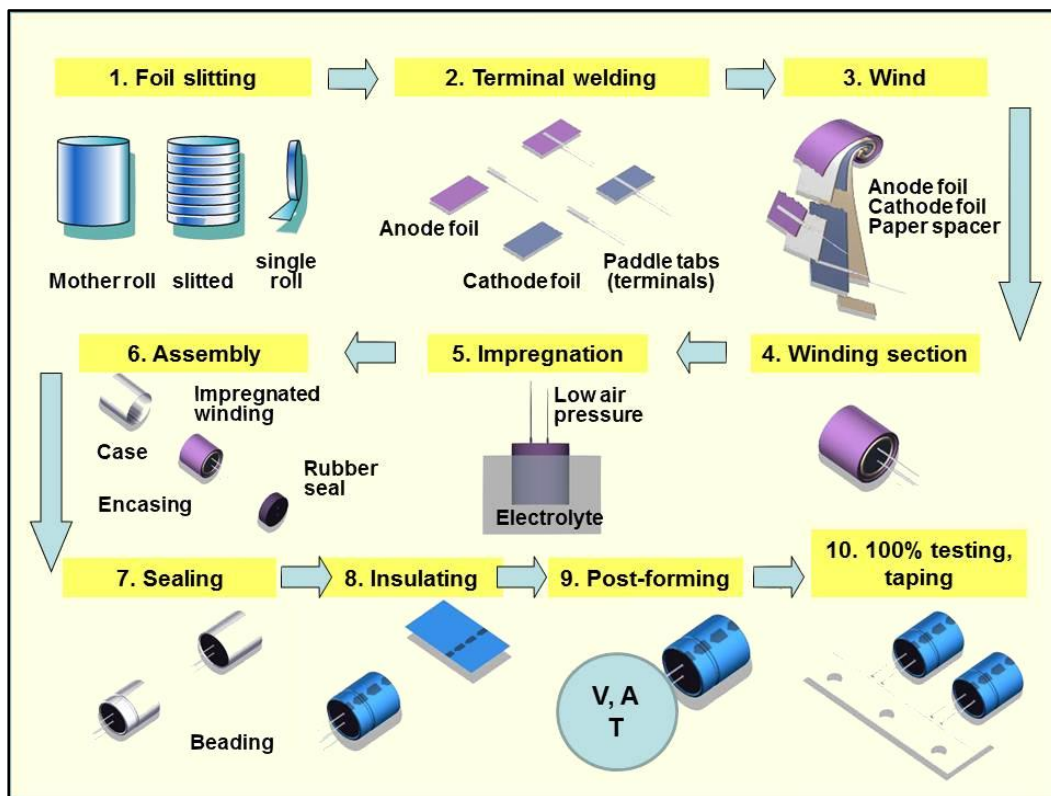


Figura 1.3. Fabricació dels condensadores [2]

1.1.2.2. Funcionament del condensador [3]

La figura 1.4. mostra un esquema del principi de funcionament del condensador. Quan es força una diferència de tensió entre els terminals del condensador, els electrons del pol negatiu del generador s'acumulen en l'armadura connectada a aquest pol (placa B). Simultàniament, la placa B

cedeix electrons al pol positiu del generador, de tal manera que queda carregada positivament.

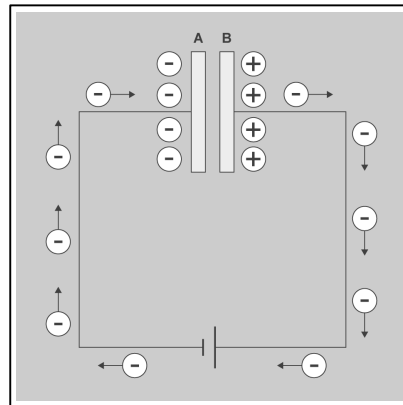


Figura 1.4. Principi de càrrega d'un condensador [3]

Un cop carregat el condensador, si desconnectem el generador, queda carregat a la mateixa tensió que el generador. La càrrega es manté fins que es tornen a equilibrar, sigui per mitjà de corrents de fuga (veure pàgina 9) o per mitjà d'un circuit exterior.

1.1.2.3. Càrrega i descàrrega de condensadors [3]

En connectar un condensador a un circuit elèctric, seguint el principi anterior, aquest es carrega fins a una tensió igual a la del generador. El generador, en anar descarregant-se, disminueix també la intensitat del circuit. Així, en el procés de càrrega, el generador veu disminuïda la seva tensió i el corrent que atorga al circuit per a que sigui el condensador qui absorbeixi la tensió. Ambdós processos necessiten d'una resistència externa en sèrie per a garantir una càrrega i descàrrega eficient i evitar que el condensador absorbeixi pics de tensió. Llavors, la resistència actuaria com a element de seguretat.

En el procés de descàrrega, passa exactament el mateix però els fets s'intercanvien, ara el condensador perd tensió amb el temps, i així atorga un menor corrent amb el pas del temps. Les següents figures 1.5(a). I 1.5(b) mostren els processos de càrrega i descàrrega dels condensadors.

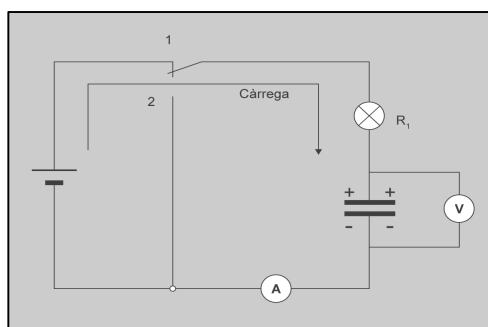


Figura 1.5(a). Càrrega [3]

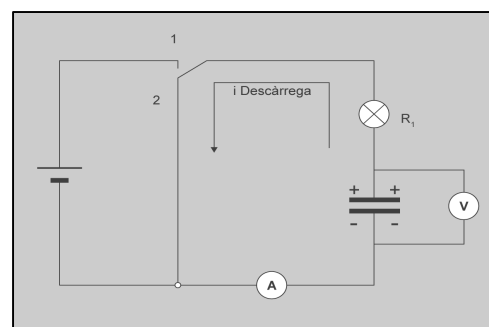


Figura 1.5(b). Descàrrega [3]

En ambdós casos, la bombeta s'encendria. Cal remarcar que posar-hi una bombeta és il·lustratiu ja que la seva resistència podria marcar molt el funcionament del condensador. Així doncs, la bombeta, durant ambdós processos aniria disminuint la seva brillantor a causa de la disminució del corrent que circula pel circuit.

Es defineix també la constant de temps τ de càrrega i descàrrega d'un condensador. El seu valor és aquell temps en què el condensador s'ha carregat en un 63,1%. A la pràctica, es considera un condensador totalment carregat al cap de 5τ (si es carrega a tensió constant).

1.1.3. Propietats del condensador

Com tot aparell electrònic, els condensadors tenen propietats físiques i elèctriques que defineixen el seu comportament i funcionament, en un circuit elèctric per exemple [4].

1.1.3.1. Capacitat

La capacitat d'un condensador és la capacitat d'emmagatzemar càrregues elèctriques en estar sotmès a una diferència de tensió. Un condensador que emmagatzema una càrrega elèctrica màxima (Q) i una diferència de tensió entre armadures (V) té un valor de capacitat que ve definit per la següent equació (Eq.1):

$$C = \frac{Q}{V} \text{ (C)} \quad (\text{Eq. 1})$$

On;

C : Capacitat (Farads, F)

Q : Càrrega elèctrica emmagatzemada (Coulombs, C)

V : diferència de tensió (Volts, V)

La capacitat d'un condensador depèn dels factors següents:

- a) Superfície de les armadures enfrontades.
- b) Separació de les armadures, doncs a major separació, major capacitat.
- c) Material dielèctric, fent variar la permitivitat dielèctrica (ϵ)

L'equació (Eq.1), per tant, pot prendre la següent forma, en condensadors plans:

$$C = \epsilon \cdot \frac{S}{d} \text{ (C)} \quad (\text{Eq. 2})$$

On;

C : Capacitat (Farads, F)

ϵ : Constant dielèctrica (Coulombs, C)

S : Superfície enfrontada d'armadura (m^2)

d : Separació entre plaques (m)

1.1.3.2. Impedància (Reactància Capacitiva)

En circuits alimentats amb corrent altern, un condensador funciona també com un element resistiu, la resistència en aquest cas s'anomena reactància (X_c) i ve donada per la següent fórmula:

$$X_c = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C} \quad (\Omega) \quad (\text{Eq. 3})$$

On;

ω : pulsació angular ($2\pi f$) [rad/s]

C : capacitat

Cal remarcar que un condensador en un circuit de CC (Corrent Continu) treballa com a condensador ideal i esdevé un circuit obert, podent-se carregar i descarregar durant els transitoris.

1.1.3.3. Energia emmagatzemada

L'energia que un condensador pot emmagatzemar ve donada per la definició d'energia, que és la integral del potencial, en aquest cas elèctric. Llavors, tenim la següent expressió (Eq.4) per definir l'energia emmagatzemada d'un condensador.

$$E_e = \int_{q_1}^{q_2} V \cdot dq = \int_{q_1}^{q_2} \frac{Q}{C} \cdot dq = \frac{Q^2}{2C} = \frac{[C(V_2 - V_1)]^2}{2C} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot (V_2 - V_1)^2 \quad (J) \quad (\text{Eq. 4})$$

On;

q_1 és la càrrega inicial

q_2 és la càrrega final

V_1 és la tensió inicial

V_2 és la tensió final.

1.1.3.4. Corrent de fuga

Depenent del material dielèctric que es faci servir, el condensador tindrà major o menor resistència d'aïllament de corrent, que disminueix amb la humitat i la temperatura. Els més afectats són els de mica i paper.

Llavors, si mantenim un condensador carregat durant un llarg període de temps, a través del dielèctric acaba havent-hi un corrent d'electrons, disminuint així la càrrega i la capacitat. Aquest corrent s'anomena corrent de fuga i es modelitza com una resistència en paral·lel, R_p .

1.1.3.5. Resistència sèrie dels condensadors [5]

Els condensadors, com tot element elèctric, no són components ideals i mai no actuen únicament com a capacitàncies sinó que també introdueixen un valor de resistència. És per això que els condensadors es modelen com a capacitàncies amb sèrie amb una resistència. Aquesta resistència es defineix com Resistència Equivalent Sèrie (ESR, en anglès), R_s .

Els condensadors electrolítics d'alumini solen tenir molta més ESR que els d'altres tipus, fins a alguns ohms. Aquest valor té una tendència creixent amb la freqüència, i també amb el temps. Pot incrementar el seu valor fins el punt de fer funcionar de manera incorrecta el circuit i fins i tot fer mal bé els components. En augmentar aquest valor de resistència, per efecte Joule augmenten les pèrdues energètiques i augmenta la temperatura del sistema. El valor que pot prendre aquesta resistència per a condensadors estàndard d'alumini està entre els 2 i 30 Ω depenent de la capacitat del condensador [5].

1.1.3.6. Tensió de ruptura

És la tensió màxima instantània que es pot aplicar als terminals d'un condensador per a que no es pugui córrer el risc de perforar el material dielèctric i, conseqüentment, provocar un curtcircuit entre les armadures.

A continuació es mostra la taula 1.1. que indica els valors de tensió de ruptura pels diferents tipus de condensadors.

TAULA 1.1. Tensions de ruptura de diversos tipus de condensadors

Condensador			Rango de valores	Rango de tensiones máximas de trabajo Vcc
Tipo	Dieléctrico	Armadura		
Mica	Mica	Aluminio o deposito de plata	2 pF a 22 nF	250 - 4000 V.
Papel	Papel parafinado	Aluminio	1 nF a 10 uF	250 - 1000 V.
Styroflex	Poliestireno	Aluminio	10 pF a 4.7 nF	25 - 63 V.
			4.7 uF a 22 nF	160 - 630 V.
Políester	Políester	Aluminio	4.7 nF a 1.5 uF	100 - 160 V.
			1 nF a 470 nF	400 - 1000 V.
Políester metalizado	Políester	Aluminio depositado al vacío	47 nF a 10 uF	63 - 100 V.
			10 nF a 2.2 uF	250 - 400 V.
			10 nF a 470 nF	630 - 1000 V.
Polícarbonato metalizado	Polícarbonato	Aluminio depositado al vacío	47 nF a 10 uF	63 - 100 V.
			10 nF a 2.2 uF	250 - 400 V.
			10 nF a 470 nF	630 - 1000 V.
Cerámico (grupo 1)	Cerámica	Depósito de plata	0.56 pF a 560 pF	63 - 100 V.
			0.47 pF a 330 pF	250 - 500 V.
Cerámico (grupo 2)	Titanato de Bario	Depósito de plata	4.7 nF a 470 nF	15 - 50 V.
			220 pF a 22 nF	63 - 100 V.
			100pF a 10 nF	250 - 500 V.
			470 pF a 10 nF	1000 V.
Electrolítico de aluminio	Oxido de Aluminio	Aluminio	100 a 10,000 uF	4 - 10 V
			2.2 a 4700 uF	16 - 40 V.
			0.47 a 2200 uF	63 - 160 V.
			2.2 a 220 uF	200 - 450 V.
Electrolítico de tantalio	Oxido de tantalio	Positivo: Tantalio Negativo: Metalizado	2.2 a 100 uF	3 - 10 V
			220 nF a 22 uF	16 a 40 V

Aquesta, la tensió de ruptura, serà una de les propietats que prendran importància per a contrastar els resultats obtinguts amb el que va ser la realitat.

1.1.4. Tipus de condensadors

Com la capacitat d'un condensador és la variable més important, i aquesta pot ser fixa, variable o ajustable. Es diferencien aquests tres tipus de condensadors. [4]

1.1.4.1. Condensadors de capacitat fixa

Són aquells que la seva capacitat no és configurable després de la seva fabricació, que no pot variar. Depenent del material dielèctric que s'hagi fet servir per fabricar-los poden tenir millors o pitjor propietats. Materials dielèctrics comuns són el paper, el plàstic, la mica, el vidre, la ceràmica i els anomenats electrolítics, els quals ocupen aquest projecte.

Les propietats de cada un dels fan ideals per a diferents usos com per exemple l'arrencada de motors, rectificació de circuits electrònics, eliminació de soroll en

senyals, etc. Els electrolítics ofereixen més capacitat en menys volum. Això és a causa de la capa d'òxid d'alumini que funciona com a dielèctric. Aquesta capa, per la seva primor i la intensitat de camp elèctric que suporta, fa que els condensadors electrolítics d'alumini ofereixin una major capacitat en un reduït volum. Tenen polaritat, que s'ha de respectar per a no fer mal bé el condensador. Es fan servir per a grans capacitats. N'hi ha d'alumini i de tàntal. La figura 1.6. mostra un diagrama de la classificació dins d'aquest grup de condensadors de capacitat fixa.

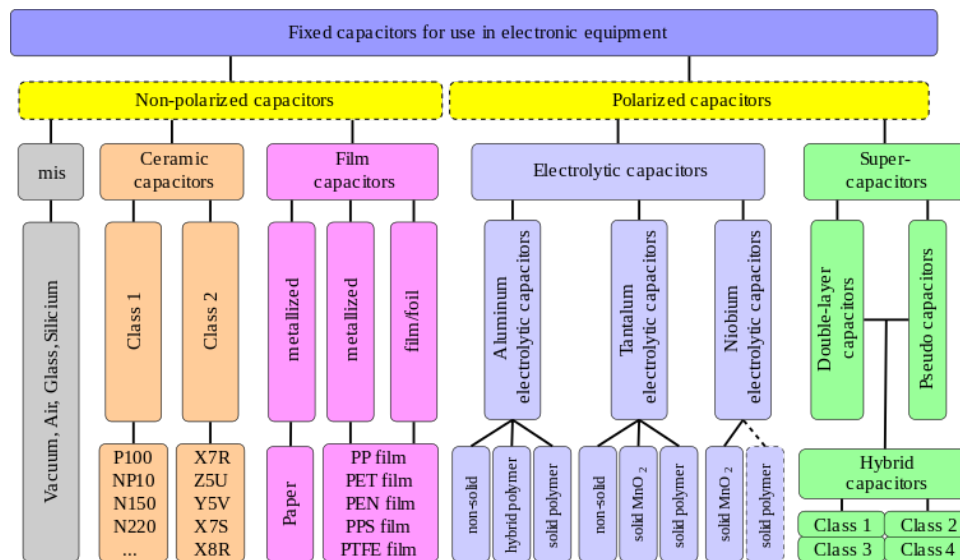


Figura 1.6. Subclassificació dels condensadors de capacitat fixa. [4]

1.1.4.2. Condensadors de capacitat variable

Es caracteritzen per tenir la capacitat variable depenent dels paràmetres que en l'equació 2 s'han anomenat, la superfície enfrontada i la distància de separació entre plaques. Es fan servir per a circuits oscil·lants i per a sintonitzar emissores de ràdio.

1.1.4.3. Condensadors ajustables

Podrien incloure's en els condensadors variables, però aquesta variabilitat només se sol aplicar un cop per a deixar-los fixes en el circuit. Es coneixen com a trímerns i poden ser de mica, d'aire o ceràmics.

1.1.5. La degradació dels condensadors

Els condensadors electrolítics, que són els que ocupen aquest treball, poden fallar amb el temps. Fins i tot, pel fet de no fer-los servir durant un període llarg de temps, el dielèctric es degrada. Com menys es fa servir, més empitjora el dielèctric [2]. La capacitat es redueix i la taxa de corrents de fuga augmenta. Si el condensador es troba carregat i aquest corrent de fuga arriba a ser suficient, fins i tot pot provocar una dissipació de potència suficient involuntària que pot causar l'ebullició de l'electròlit, rompent i fent mal bé el condensador. És a dir, el dielèctric d'un condensador que no es fa servir en un període llarg de temps es va degradant i quan el condensador es va a fer servir, poden veure's disminuïdes les seves propietats per aquests corrents de fuga a causa de la degradació del dielèctric.

Una altra manera de degradació és simplement el seu mal ús. Un condensador amb polaritat mal connectat al circuit. Un condensador que no ha treballat en els marges de tensió i corrent que estima de seguretat el fabricant. Tots aquests motius poden provocar la ruptura del condensador. La figura 1.7. mostra una imatge d'un condensador que, pel seu mal ús ha esclatat.

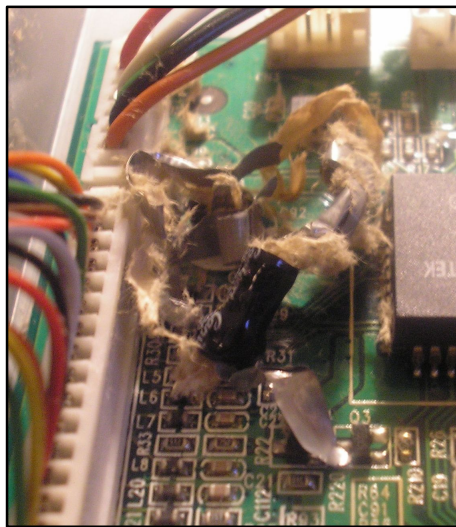


Figura 1.7. Condensador catastròficament degradat.

1.2. TERMODINÀMICA, ENTROPIA I TRANSFERÈNCIA DE CALOR

La termodinàmica és una branca de la física que estudia els efectes dels canvis de la temperatura, pressió i volum dels sistemes físics a un nivell macroscòpic. Descriu com els sistemes responen a canvis en el seu entorn. Els resultats de la termodinàmica són essencials per a camps de la física i la química, i enginyeries en general.

A continuació es detallaran les lleis de la termodinàmica que són aplicades en aquest projecte.

1.2.1. Llei Primera de la Termodinàmica

És una adaptació per la termodinàmica de la llei de la conservació de l'energia. Es defineix l'energia interna del sistema, E , com la seva energia respecte del SR (Sistema de Referència) del centre de massa.

- El treball necessari per a canviar l'estat d'un sistema aïllat depèn únicament dels estats inicials i final, i és independent del mètode usat per a realitzar el canvi.

Per tant, existeix una funció d'estat que identifiquem com l'energia interna. El treball realitzat sobre el sistema és W . Per tant, el canvi de l'energia interna durant una transformació adiabàtica (és a dir, que no intercanviï calor amb el seu entorn) és $\Delta E = W$. El sistema també pot variar la seva energia sense realitzar treball mecànic, aleshores es transfereix d'una altra forma, com calor.

Per tant, ara definim el terme *calor* (Q), que és el canvi de l'energia interna del sistema que no es deu al treball. Ara, la conservació de l'energia queda com, $\Delta U = Q + W$.

1.2.2. Llei Segona de la Termodinàmica

El que afirma aquesta llei és que la quantitat d'entropia de l'univers, tendeix a augmentar amb el temps.

La segona llei proporciona, aleshores, la base per al concepte termodinàmic d'entropia:

Existeix una funció d'estat dels paràmetres extensius (massa, volum...) de qualsevol sistema termodinàmic, anomenada entropia (S), amb les següents propietats:

1. Els valors que prenen les variables extensives són els que maximitzen S .
2. L'entropia d'un sistema compost és la suma de les entropies dels subsistemes constituents (combinats) i és una funció contínua, diferenciable i monòtonament creixent de l'energia.

1.2.3. L'entropia, el desordre i els processos irreversibles

L'entropia és una magnitud física termodinàmica que permet mesurar la part no utilitzable de l'energia continguda en un sistema. Això vol dir que dita part d'energia no pot usar-se per produir un treball. També s'entén per entropia la mesura del desordre del sistema. En aquest sentit, està associada a un grup d'homogeneïtat. I es defineix per la següent equació, (Eq. 5)

$$ds = \frac{dQ}{T} \quad \text{ò} \quad S_2 - S_1 = \frac{Q_2 - Q_1}{T} \quad (\text{Eq. 5})$$

L'entropia no està definida com a una magnitud absoluta sinó com una diferència entre l'entropia inicial i final d'un sistema.

1.2.4. La transferència de la calor

La calor es defineix en física com a la transferència de l'energia tèrmica a través d'un contorn ben definit al voltant d'un sistema termodinàmic [8]. La transferència de calor és una funció de camí, al contrari que les funcions d'estat. Així doncs, la quantitat de calor transferida en un procés termodinàmic que canvia l'estat d'un sistema depèn de com ocorre aquest procés i no només de la diferència neta entre les condicions finals i inicials.

Els processos fonamentals de la transferència de la calor són els següents:

1.2.4.1. Advecció

L'advecció és el transport d'un fluid d'una localització a una altre i depèn de la quantitat de moviment d'aquest fluid. Un exemple n'és la transferència de calor en un oceà a causa del pas de grans blocs de gel.

1.2.4.2. Conducció

La conducció tèrmica és la transferència de calor per col·lisions microscòpiques de partícules en moviment en un cos. Aquestes partícules (àtoms, electrons...) transfereixen energia cinètica a escala microscòpica. La conducció es dona en qualsevol estat de la natura.

La conducció és el mode de transferència de calor més significant entre sòlids que es troben en contacte tèrmic. Les partícules no es desplacen com en el cas

de l'advecció però sí que, amb els seu moviment local (vibració) transfereixen aquesta calor a les partícules veïnes.

Es poden donar dos tipus de conducció [9], els quals es descriuen a continuació:

Conducció estacionària

Es dona quan les diferències de temperatura són constants (després del temps d'equilibri). La distribució espacial de temperatures (camp de temperatures) no canvia més amb l'espai, això és, les derivades parcials respecte les coordenades espacials poden no ser zero, però les derivades parcials respecte del temps sí que han de ser estrictament zero. En la conducció estacionària, la quantitat d'energia entrant en una regió de l'objecte es veurà compensada per una sortida d'energia en una altra regió del mateix.

Conducció transitòria

A diferència de la conducció estacionària, en la transitòria els termes de derivades parcials temporals poden no ser zero. Per això rep també el nom de conducció no estacionària.

L'anàlisi de sistemes de conducció no estacionària és més complex que aquell en conducció estacionària. Per aquest motiu és necessari sovint l'aplicació de teories aproximades i/o mètodes numèrics de computació. Per a resoldre aquests tipus de problemes es recorre a l'equació de la calor, definida posteriorment en la secció 2.3.2.

1.2.4.3. Convecció

És la transferència de calor d'un lloc a un altre mitjançant el moviment de fluids, un procés que és essencialment via transferència de massa. És el mode de transferència de calor dominant en gasos i líquids. Un exemple d'on aplica la convecció és en els intercanviadors de calor, on, mitjançant canonades s'aconsegueix transferir calor entre canonades calentes i fredes per a reduir o augmentar la temperatura de gasos o fluids.

1.2.5. Magnituds físiques en la transferència de calor

Bàsicament es defineixen dues propietats tèrmiques dels materials que són rellevants per a l'estudi d'aquest projecte i que són paràmetres en l'equació de la calor que s'introduirà en la secció 2.3.2.

Aquestes propietats són la conductivitat tèrmica i el calor específic (o capacitat tèrmica). Els paràgrafs a continuació definiran aquests paràmetres.

1.2.5.1. Conductivitat tèrmica

La conductivitat tèrmica [10] és una propietat física dels materials que mesura la capacitat d'aquest material per a conduir i transferir calor. També pot definir-se com la capacitat de transferir l'energia cinètica d'unes molècules del material a les veïnes, així com s'ha comentat en l'apartat 1.2.4.2. En el Sistema Internacional d'Unitats (SI) la conductivitat tèrmica es mesura en $W/K \cdot m$ (equivalent a $J/m \cdot s \cdot K$) i es representa per la lletra k . L'equació (Eq.6) mostra la fórmula que defineix la conductivitat tèrmica.

$$k = \frac{\dot{q}}{|\nabla T|} \quad (Eq. 6)$$

On;

\dot{q} és el flux de calor (per unitat de temps i unitat d'àrea)

∇T és el gradient de temperatura

Per tant, una conductivitat tèrmica de 1 watt per metre i kelvin indica que una quantitat de calor d'un joule es propaga per un material per conducció tèrmica:

- en 1 segon,
- per una superfície de $1 m^2$,
- per un grossor de 1 m,
- quan la diferència de temperatura entre les dues cares és de 1 K.

A major conductivitat tèrmica, millor conductor de la calor és el material. I a menor conductivitat tèrmica, més aïllant és el material.

1.2.5.2. Calor específica

La capacitat calorífica específica [11], la calor específica o capacitat tèrmica específica és una magnitud física que es defineix com la quantitat de calor que s'ha de subministrar a una unitat de massa d'un sistema termodinàmic per incrementar la seva temperatura en una unitat. I es representa per la lletra c (minúscula). En aquest projecte, en l'equació de la calor es denota amb un subíndex p, c_p . A major calor específica, més energia calorífica es necessita per a incrementar la temperatura d'un material. L'equació (Eq. 7) mostra la fórmula que defineix la calor específica.

$$c = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{Q}{m \Delta T} = \frac{1}{m} \frac{dQ}{dT} \quad (Eq. 7)$$

On;

Q és la transferència d'energia calorífica entre el sistema i l'entorn

m és la massa del sistema

ΔT és l'increment de temperatura que experimenta el sistema

És a dir, la calor específica és la quantitat d'energia Q que s'ha d'aplicar a un cosa de massa m per a obtenir un augment de temperatura de ΔT K (ò °C).

1.3. ESTUDIS PREVIS

1.3.1. Thermal Modeling of Aluminum Electrolytic Capacitors [12]

En aquest apartat, introduïrem un estudi que va portar a terme Sam G. Parler, Jr. El seu treball va ser el de la modelització tèrmica de capacitors electrolítics d'alumini. Va treballar amb simulacions d'elements finits i les seves solucions.

Considerant un model físic tridimensional va trobar que la simetria porta a la utilització de coordenades cilíndriques (les mateixes que s'han fet servir per a l'estudi que ocupa aquest treball). El valor de la conductivitat tèrmica en direcció angular es va negligir i a més, es va assumir conductivitats tèrmiques radials i axials constants. La derivació de la distribució de temperatures ve donada considerant una secció en funció del radi intern (λ) que anirà incrementant ($d\lambda$) (Eq.8).

Considera llavors;

$$A(\lambda) = 2\pi\lambda L \quad (\text{Eq. 8})$$

Es coneixia la temperatura a $r=R_0$, per tant:

$$T(r) = T_0 + \int_r^{R_0} \frac{P \cdot d\lambda}{2\pi\lambda L} \quad (\text{Eq. 9})$$

que se simplifica com;

$$T(r) = T_0 + \frac{P \cdot \ln(R_0/r)}{2\pi\lambda L} \quad (\text{Eq. 10})$$

L'equació (Eq. 10) assumeix que no hi ha pèrdues de calor axials.

Els resultats finals de les mesures i les simulacions van mostrar un comportament logarítmic/exponencial decreixent, com mostra la figura 1.8.

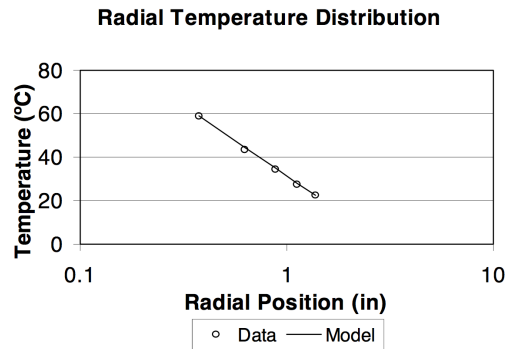


Figura 1.8. Resultats obtinguts en l'estudi previ

Va obtenir l'expressió que definia el comportament tèrmic del condensador.

Equació de la temperatura en direcció radial $T(r)$:

$$T(r) = \frac{-Pr^2}{4\pi c(R_0^2 - R_1^2)Lk_r} + C_4 \cdot \ln(r) + C_5 \quad \text{Eq(11)}$$

On, C_4 i C_5 són constants en funció de paràmetres del material.

Aquest varen ser els resultats obtinguts per Sam G. Parler que podran comparar-se amb els resultats que s'han obtingut amb l'estudi d'aquest projecte.

La finalitat, llavors, d'aquest apartat és veure com les expressions logarítmiques com l'esmentada en l'equació (Eq.10) encaixen amb el perfil de temperatures al llarg del radi de les simulacions portades a terme.

1.3.2. Estudi de l'envelliment de sistemes electrònics [13]

En aquest apartat s'introdueix el TFG d'en Ramon Romero Sangüesa on va portar a terme un estudi de la caracterització dels danys i efectes que comporta la injecció d'un nivell de potencia elevat.

Va avaluar les dades obtingudes amb les mesures fetes al banc de proves i va extreure les conclusions que confirmen que la teoria de generació d'entropia és un mètode vàlid per caracteritzar el dany induït als elements capacitius per la part de l'energia injectada al condensador que no es dissipa en calor i que degrada el component.

Fent servir condensadors de distintes capacitats els hi va aplicar diferents nivells de tensió. Va estudiar els efectes que varen tenir els paràmetres de capacitat i tensió en la degradació d'aquests components i va extreure les següents conclusions.

Es pot dir que la noció de generació d'entropia és un mètode vàlid per caracteritzar el dany induït als elements capacitius degut a la part de l'energia injectada al condensador que no es dissipa en calor i que degrada el component, i que l'anàlisi del S_{rate} és un bon indicador del grau de dany induït.

La tendència general de tots els condensadors és que en pujar la tensió d'alimentació la capacitat es degradi més ja que la generació d'entropia és major. Si es relaciona amb la taxa de variació d'entropia (S_{rate}), es veu que quan més alt és el valor de la corba més cau la capacitat, per tant, quan el condensador es degrada, es manifesta tant a la S_{rate} com a la seva capacitat.

Per tant, amb aquests dos estudis previs, la modelització del comportament tèrmica del condensador, i l'estudi de la degradació del mateix quan s'hi apliquen tensions altes, aquest projecte intentarà agrupar aquests dos aspectes i veure què passa, en detall, a l'interior d'aquests condensadors.

CAPÍTOL 2. MATERIALS I MÈTODES

2.1. CARACTERÍSTIQUES DELS CONDENSADORS ESTUDIATS

Els condensadors estudiats són de la marca PANASONIC, en concret el model ECEA0GKS330 [13]. Són condensadors d'alumini electrolítics. A la figura 2.1. es mostra l'aspecte físic del condensador.



Figura 2.1. Tipologia de condensador analitzat

Dins la classificació de condensadors, aquests pertanyen al grup de capacitat fixa, com s'ha dit, en concret als electrolítics. Són condensadors fets a partir de dues bandes d'alumini, una de les quals està coberta per una capa aïllant d'òxid, i un paper xop en electròlit entre elles. La banda aïllada és l'ànode, mentre que l'electròlit i l'altra banda funcionen com a càtode. La làmina de paper funciona de separador per evitar el contacte metàl·lic. Un cop acoblades les tres capes (ànode, separador i càtode) és el moment del bobinat, tot incloent els terminals, pròpiament connectats a cada una de les armadures.

Amb aquest tipus de condensadors, en ser polaritzats, s'ha d'anar amb cura a l'hora de connectar-los en circuits elèctrics o electrònics, ja que una connexió polaritzada inversament pot fer malbé el condensador i fins i tot, depenent de les tensions i corrents aplicats, aquest pot arribar a esclatar.

La geometria dels condensadors es la que es mostra a la següent taula:

TAULA 2.1. Geometria i tensió de ruptura dels condensadors

Dimensió	Mesura	Tensió de ruptura
Altura	1 cm	16-160 V
Radi	5 mm	

2.2. ARXIU DE DADES

S'han analitzat arxius de dades que es van generar a partir del projecte de final de grau anterior, per part de l'estudiant Ramón Romero [13]. Els arxius es refereixen a un mateix model de condensador. La següent notació mostra el procés experimental que es va seguir.

" $C_{\mu F_XV_TIPOLOGIA_YVcc}.xlsx$ "

On;

C és la capacitat nominal del condensador (en microfarads, μF)

X és la diferència de tensió nominal del condensador

$TIPOLOGIA$ és el mode en que el condensador va rebre la potència

Y és la tensió que finalment va caure al condensador

Per tant, un exemple de notació seria el següent:

" $33\mu F_4V_POLSAT_40Vcc.xlsx$ "

En aquest cas, és un condensador de $33 \mu F$, amb una tensió nominal de 4 V, on la potència va ser injectada de manera polsada (fent servir un interruptor) i la tensió que va arribar a caure al condensador és de 40 V (deu vegades més que la tensió nominal) i de l'ordre de tensions de ruptura indicats en la taula 1.1. Les dades d'entrada pel codi informàtic de MATLAB s'han extret d'arxius Excel que recollien els paràmetres més rellevants per l'estudi. En la figura 2.2. es mostra el format d'entrada d'aquests fulls de càlcul.

t	Capacitat	Xc con V	I>imx	Ic	Pc	T th	Srate	int P/T	Vc	Array srate Vcc	t on	t off	Duty
0	4,31E-05	739,384	0	1,1863	23,8	299,852	0,0794	0,07937	20,062	0 0,084888	31,925	0,608	3,587
1										1 0,07654			
2										2 0,076641			
3										3 0,079505			
4,203	4,15E-05	766,644	0	1,1615	25,696	325,891	0,0788	0,15822	22,124	0 0,075062	33,739	0,607	3,582
1										1 0,076155			
2										2 0,08051			
3										3 0,083509			
8,391	3,86E-05	824,668	0	1,0335	26,64	360,582	0,0739	0,2321	25,776	0 0,071023	36,111	0,608	3,587
1										1 0,072719			
2										2 0,078532			
3										3 0,066371			
12,59	3,72E-05	855,665	0	0,6783	22,192	391,054	0,0568	0,28885	32,72	0 0,075095	39,502	0,6079	3,584
1										1 0,061455			
2										2 0,043866			
3										3 0,036605			
16,78	3,58E-05	888,166	0	0,4348	15,83	411,647	0,0385	0,32731	36,409	0 0,053616	40,757	0,6139	3,587
1										1 0,039696			
2										2 0,032314			
3										3 0,026517			
20,98	1,40E-05	2277,6	0	0,3168	11,919	425,951	0,028	0,35529	37,627	0 0,036345	40,794	0,6069	3,587
1										1 0,02931			
2										2 0,024822			
3										3 0,021027			

Figura 2.2. Captura del format de dades Excel

Les dades en els arxius venen per files i per columnes, cada fila correspon a un instant de temps en què es tenen dades i cada columna correspon a cada variables d'estudi com són la temperatura externa (T^a), el corrent (I_c), la tensió (V_c) i la potència (P_c). La tendència de les variables en el temps és creixent als primers instants fins arribar al seu pic i decreixent fins arribar a l'últim instant d'estudi. [12]

2.3. L'EQUACIÓ DIFERENCIAL.

Es diferencien dos tipus d'equacions diferencials [19], les que depenen només d'una variable (i les derivades de la funció respecte d'aquesta variable), anomenades ordinàries (ODE, de les sigles en anglès) i les que depenen de més d'una variable (i les seves derivades), anomenades parcials (PDE). El tipus d'equació que ocupa aquest projecte és l'equació diferencial parcial (PDE). El motiu pel qual la solució a aquest projecte passa per les PDE és perquè la temperatura o perfil de temperatures dels condensadors depèn de variables com la posició (coordenades x i y , dues variables) en la secció del condensador i una tercera variable com és el temps. Si fos el cas que la funció a estudiar depengués estrictament de coordenades de posició, i aquesta posició es pogués definir de manera unidimensional faria possible l'anàlisi amb ODEs. Però tenim 3 variables que fa necessari l'ús de PDEs.

Per tant, la resolució és més complicada en el cas de les PDE pel fet que les funcions que estudien són, com s'ha dit, de més d'una variable.

2.3.1. L'equació diferencial parcial (PDE)

A més de les característiques de les PDE introduïdes en el començament de l'apartat 2.3, les PDE son equacions que involucren taxes de canvi de les variables. La posició d'un cos rígid és especificada per quatre variables (tres de posició i una de temps), però la configuració d'un fluid ve donada per la distribució de diversos paràmetres com són la temperatura i la pressió, entre d'altres.

La forma típica d'una PDE és la que es mostra en l'equació (Eq.12)

$$f\left(x_1, \dots, x_n, u, \frac{\partial u}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial u}{\partial x_n}, \frac{\partial^2 u}{\partial x_1 \partial x_1}, \dots, \frac{\partial^2 u}{\partial x_1 \partial x_n}\right) = 0 \quad (\text{Eq. 12})$$

En les PDE se segueix una notació especial per a fer més senzilla la seva escriptura i comprensiu el seu càlcul. És comú fer servir subíndexs per a denotar derivades parcials. Per tant, podem definir el següent.

$$u_x = \frac{\partial u}{\partial x}; \text{ primera derivada respecte } x$$

$$u_{xx} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}; \text{ segona derivada respecte } x$$

$$u_{xy} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) = \frac{\partial^2 u}{\partial y \partial x}; \text{ derivada respecte } y \text{ de la derivada de } u \text{ respecte } x$$

Pel que fa a les derivades temporals, es denota amb un accent puntual amb tants punts com el grau de la derivada, tal com es mostra a continuació.

$$\dot{u} = \frac{\partial u}{\partial t}; \text{ primera derivada temporal}$$

$$\ddot{u} = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}; \text{ segona derivada temporal}$$

Un cop definides aquestes notacions, es passa a descriure la classificació de les PDE segons el grau de les mateixes. Per començar, definim el grau d'una PDE com la derivada de major ordre que posseeixi la PDE, ja sigui respecte la mateixa variable, u_{xx} , o bé derivades creuades, u_{xy} .

2.3.1.1. Equacions diferencials parcials de primer grau

Són aquelles que com s'ha definit, la seva derivada màxima és de primer grau. Pot haver-hi un nombre determinat de derivades respecte de qualsevol variable, però aquesta derivada serà primera. Per tant, les funcions PDE de primer grau tindran la forma que apareix en l'equació (Eq.13)

$$f(x_1, \dots, x_n, u, u_{x_1}, \dots, u_{x_n}) = 0 \quad (\text{Eq. 13})$$

2.3.1.2. Equacions diferencials parcials de segon grau

Ara, les equacions diferencials parcials de segon grau són aquelles que la derivada màxima és de segon ordre, ja sigui respecte de la mateixa variable ($\partial^2 u / \partial x^2$) com derivades creuades ($\partial^2 u / \partial x \partial y$), com s'ha comentat abans. L'equació (Eq. 14) mostra el format de les PDE de segon ordre.

$$Au_{xx} + 2Bu_{xy} + Cu_{yy} + \dots (\text{termes de menor grau}) = 0 \quad (\text{Eq. 14})$$

On A, B, C ... són constants. Aquesta forma s'assimila molt a la que pren l'equació de les seccions còniques, (Eq. 15).

$$Dx^2 + Exy + Fy^2 + \dots = 0 \quad (\text{Eq. 15})$$

Aquesta similitud porta a la classificació de les PDE en funció del valor del discriminant $B^2 - AC$.

- (a) Si $B^2 - AC < 0$, s'anomena PDE el·líptica
- (b) Si $B^2 - AC = 0$, s'anomena PDE parabòlica
- (c) Si $B^2 - AC > 0$, s'anomena PDE hiperbòlica

Per acabar, dins de les PDE parabòliques es troba l'equació sobre la que es desenvolupa tot l'estudi que ocupa aquest projecte, l'equació de la calor. A continuació s'introdueix i es definiran en detall tots els aspectes de la mateixa.

2.3.1.3. Condicions inicials i condicions de contorn

Per a la resolució de les PDE és necessari tenir les anomenades condicions inicials (IC, *Initial Conditions*), que dona valor a la funció original en l'instant inicial ($t=0$). Així són necessàries també les anomenades condicions de contorn (BC, *Boundary Conditions*) que defineixen el valor de la funció en els límits de la regió d'estudi.

En el cas d'aquest projecte, s'han tingut valors de temperatura en l'exterior del condensador al llarg del temps (BC), i la primera d'aquestes mesures correspon llavors a les condicions inicials (IC). Així doncs, tenim la definició de les BC i IC a continuació.

– $T(r, t = 0) = T(r, 0)$; Escalar que defineix la temperatura inicial

– $T(r = R, t) = T(R, t)$; Funció temporal que defineix la temperatura externa

Un cop s'ha introduït la teoria bàsica de les PDE, es presentarà ara la teoria que hi ha darrere la PDE en qüestió, l'equació de la calor.

2.3.2. L'equació de la calor

L'equació de la calor és una de les equacions diferencials parcials de segon grau parabòliques que descriu la distribució de la calor o la variació de la temperatura en un sòlid o regió determinats.

Per a una funció u depenent de les tres variables espacials "x", "y" i "z" i la temporal "t", l'equació de la calor pren la forma que es mostra en (Eq. 15).

$$\frac{\partial u}{\partial t} - \alpha \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (\text{Eq. 15})$$

o bé,

$$\frac{\partial u}{\partial t} - \alpha \nabla^2 u = 0 \quad (\text{Eq. 16})$$

On u seria la funció a analitzar, en aquest cas la temperatura T i α és la difusió tèrmica. En l'equació (Eq. 16), es generalitza i es fa servir l'operador Laplacà per a qualsevol sistema de referència. La part dreta de l'equació, essent zero simbolitza que tot augment de temperatura en una determinada regió del material ve acompanyada per una disminució de la mateixa en una altra regió del material, en no haver-hi present cap generació externa de calor i cap transferència de temperatura.

Ara bé, quan l'equació de la calor es combina amb l'equació de conservació de l'energia, com diu la primera llei de la termodinàmica, l'equació de la calor es reescriu de la manera que es mostra en (Eq. 17). Ara, al terme de la dreta de l'equació es té el terme font, generador de calor, que serà el responsable del canvi de temperatures en el condensador i de que es mantingui la igualtat de l'equació 17.

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = \dot{q}_v \quad (\text{Eq. 17})$$

En la taula 2.2. a continuació es defineixen i es donen les unitats (en SI) de les magnituds que intervenen a l'equació.

TAULA 2.2. Magnituds de l'equació

Magnitud		Definició	Unitats
Densitat	ρ	Quantitat de massa per unitat de volum.	$\frac{kg}{m^3}$
Calor específic	c_p	Quantitat d'energia que necessita un sistema per a incrementar la seva temperatura un grau, per unitat de massa.	$\frac{J}{kgK}$
Conductivitat tèrmica	k	Capacitat d'un material per a transferir calor.	$\frac{W}{mK}$
Terme font	\dot{q}_v	Terme generador d'energia. En aquest cas és la potència dissipada per unitat de volum.	$\frac{W}{m^3}$

Com es veurà en apartats posteriors, es tindran en compte més d'un material per a la simulació del comportament tèrmic del condensador, i per tant, es tindran en compte diversos valors per a cada una de les magnituds definides en la taula de dalt.

2.4. MÈTODE D'ELEMENTS FINITS (MEF)

El mètode d'elements finits (MEF) [14] [15] és un mètode numèric per a la resolució de problemes d'enginyeria, física i matemàtiques. Les aplicacions més comuns són l'anàlisi d'estructures, flux de fluids, transport de massa, potencial electromagnètic i, com el que ocupa aquest projecte, la transferència de calor. La solució analítica d'aquests problemes requereix de la solució de problemes de contorn i d'equacions diferencials parcials. El mètode es dirigeix a obtenir els valors de les solucions aproximades de les variables incògnites (temperatura, tensions, velocitats...) en un nombre discret de punts arreu del domini d'estudi. Aquest domini pot ser unidimensional, bidimensional o bé tridimensional.

Per a resoldre grans (o petits) problemes, el MEF en subdivideix un de gran complexitat en parts menors, més simples que són anomenades elements finits. Les equacions senzilles que modelitzen els elements finits es combinen en un sistema d'equacions major que modelitza el problema general. Llavors, el MEF utilitza mètodes de càlcul de variacions per aproximar la solució minimitzant una funció error associada. En aquest cas, l'aplicació del MEF servirà per a obtenir el valor de la temperatura en funció del temps i de l'espai en cada una de les subdivisions que donaran la solució general del problema.

2.4.1. Conceptes bàsics

La subdivisió de tot el domini en parts més simples té diversos avantatges:

- a) Representació precisa de geometries complexes.
- b) Inclusió de propietats de materials diferents.
- c) Representació fàcil de la solució total.
- d) Capturar efectes locals.

El típic funcionament del mètode involucra dos aspectes. El primer, la divisió del domini del problema en subdominis de menors dimensions, essent cada subdomini representat per un conjunt d'equacions per cada element. I un segon aspecte que tracta de recombinar tots els conjunts d'equacions en un sistema global d'equacions per al càlcul final.

El MEF s'entén millor per la seva aplicació pràctica, coneguda com anàlisi d'elements finits (AEF). L'AEF, aplicada en el camp de l'enginyeria, és una eina computacional per a desenvolupar anàlisis de qualssevol tipus. Inclou la utilització de malles ("*mesh*") per a dividir el problema complex en elements més petits, així com la utilització de software computacional amb algorismes MEF.

La figura 2.3. mostra un exemple de mallat (esquerra) i la representació de la solució final (dreta). En aquest cas es mostra la solució d'un camp magnètic divergent a causa d'un cilindre metàl·lic.

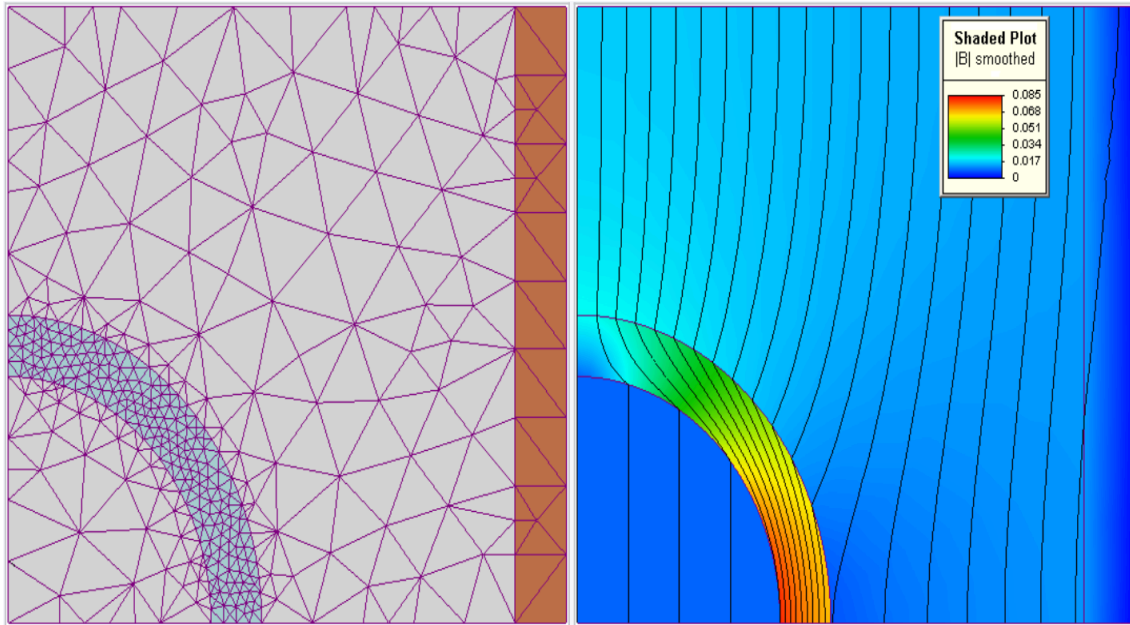


Figura 2.3. Mallat (esquerra) del domini i solució numèrica del problema (dreta)

En la següent secció 2.5. es mostrarà un exemple del mallat utilitzat en el cas que ocupa aquest projecte. Tant de dominis unidimensionals com de dominis bidimensionals.

2.5. SIMULACIONS MATLAB I TEORIA DE FALLADES.

Un cop definida la teoria que hi ha darrere de l'estudi que ocupa aquest projecte, per a la resolució del problema plantejat s'ha fet servir una de les eines informàtiques més potents que hi ha a disposició de l'estudiant universitari. Aquesta eina és el programari informàtic anomenat MATLAB, de les sigles en anglès MATrix LABoratory (Laboratori de matrius). És un entorn de computació numèrica i un llenguatge de programació creat per la companyia Mathworks [16] [17] [18].

MATLAB disposa de diverses "toolbox" per a poder portar a terme molts tipus de simulacions i computacions. I a continuació es presentaran tots aquells procediments informàtics que han calgut per a resoldre les PDE i els problemes que ha plantejat l'estudi.

Com s'ha descrit en apartats anteriors, el condensador té una disposició interna dels materials que el componen en forma de capes. Alternant alumini, òxid d'alumini, electrolit (paper + àcid bòric) i una subcapa més d'alumini es formen les capes internes que, bobinades, conformen el condensador i li donen la seva forma cilíndrica, en aquest cas.

Per tant, tenim un escenari on la generació d'energia es dóna en una geometria de cercles concèntrics que formen anells dissipatius de potència, i que rebrà el nom de CONDENSADOR MULTICAPA per a aquest projecte. Llavors, s'estructura el condensador internament, seguint l'esquema real d'aquests. S'alternen les capes anomenades en el paràgraf anterior, tot tenint en compte també una capa externa aïllant tèrmica. La figura 2.4. mostra l'estructura interna del condensador multicapa.

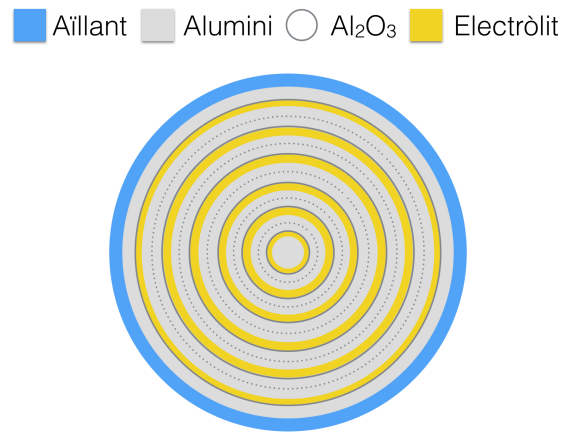


Figura 2.4. Esquema del condensador multicapa

A continuació, en la figura 2.5, es mostren dues imatges que representen la geometria circular i el mallat seleccionat per al càlcul numèric i la resolució de l'equació diferencial.

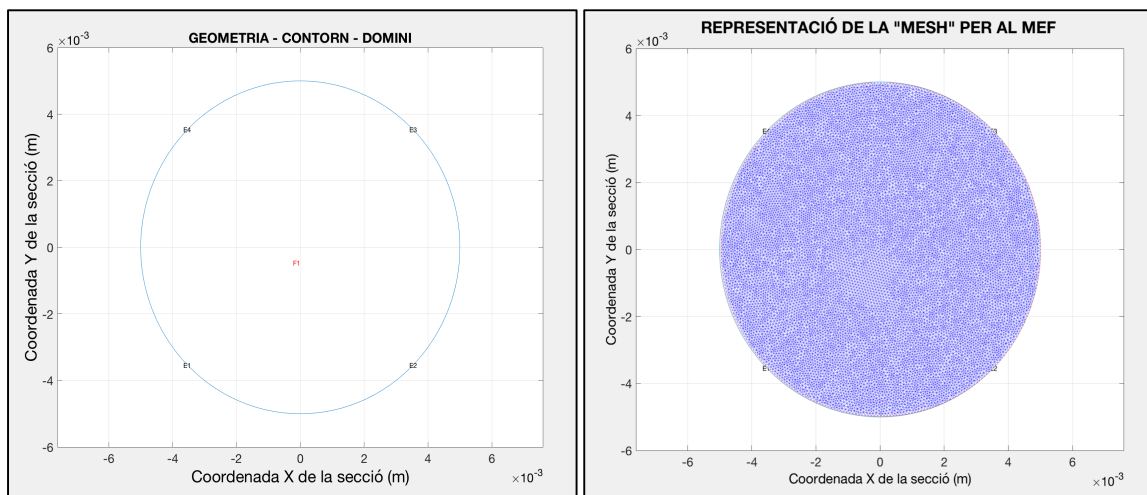


Figura 2.5. Geometria i mallat de la secció per a la resolució de la PDE

2.5.1. Dissipació de la potència dins del condensador

En aquest subapartat es tractarà el tema de com es dissipa i es distribueix la potència dins del condensador.

Com s'ha comentat anteriorment, el condensador, format per capes internes d'alumini, òxid d'alumini i electròlit en el cas que ocupa aquest projecte, connecta els seus dos terminals (armadures) a una font d'energia i és a partir d'aquest moment que es començar a injectar potència en el condensador. El model que representa el bobinat, com es mostra en la figura 2.4., ve donat per cercles concèntrics, respectant l'ordre dels materials que componen les subcapes.

Per tant, els cercles interns comportaran menor superfície (volum) i les capes externes, un major volum. Com que la potència es dissipa arreu del condensador de maner equitativa, es respectarà el tamany de les capes i se li assignarà una potència, mitjançant codi informàtic, proporcionalment amb el volum de la capa. Així doncs, s'assignaran percentatges de volum a cada capa que correspondran a la part del volum total que ocupa cada una de les capes. Aquest volum total no és el volum de tot el condensador, sinó el volum global menys el aquell corresponent a la capa externa aïllant. Tindrem les següents expressions que definiran la potència dissipada per cada capa (Eq.18).

$$p = \text{percentatge de volum} = \frac{Volum_{capa}}{Volum_{(90\% \text{ del global})} = V_{0.9}} ; p < 1 \quad (\text{Eq. 18})$$

Per associar la potència dissipada a cada capa, multiplicarem la potència instantània total per aquest "percentatge de volum" i així obtenir la potència percentual de capa, que segueix tenint unitats de potència (W).

Un cop tenim l'anomenada potència percentual de capa, hem de trobar el valor del terme font, que, segons la definició de la taula 2.2. és la potència (de capa) entre el volum que ocupa aquesta capa. Així doncs, obtenim la següent expressió.

$$\text{terme font} = \frac{\text{potència de capa}}{Volum_{capa}} = \frac{P_{capa}}{V_{capa}} = \frac{P \cdot p}{V_{capa}} = \frac{P \cdot \frac{V_{capa}}{V_{0.9}}}{V_{capa}} = \frac{P}{V_{0.9}} \quad (\text{Eq. 19})$$

Finalment, s'ha vist com el terme font queda simplificat com la relació entre potència instantània i el volum dissipatiu ($V_{0.9}$) en l'Eq.19.

2.5.1. Simulacions unidimensionals (1D)

Com hem dit abans, les equacions diferencials que s'han resolt són del tipus parcial, perquè hi ha hagut més de una variable en l'estudi. Encara que en aquest cas, la simulació s'hagi donat en una sola dimensió (x), el temps comporta una segona variable, i per tant, ja són necessàries les PDE.

S'ha fet servir la funció de MATLAB anomenada *pdepe*.

2.5.1.1. La funció MATLAB “pdepe”

Primer de tot, la funció *pdepe* té la forma general següent (Eq. 20), que descriu una equació diferencial parcial perfectament.

$$c\left(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x}\right) \cdot \frac{\partial u}{\partial t} = x^{-m} \frac{\partial}{\partial x} \left(x^m \cdot f\left(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x}\right) \right) + s\left(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x}\right) \quad (\text{Eq. 20})$$

Cal comparar la fórmula general descrita en (Eq.20) i l'equació de la calor descrita en (Eq.17). Es veu com els coeficients es relacionen de la següent manera, com es descriu en la taula 2.3.

TAULA 2.3. Relació de paràmetres

Equació 20	Equació 17	Definició
$c\left(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x}\right)$	$\rho c_p(x)$	Coefficient de la derivada temporal primera.
$f\left(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x}\right)$	$k(x)$	Coefficient de conductivitat tèrmica, de la derivada espacial segona.
$s\left(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x}\right)$	$\dot{q}_v(x, t)$	Coefficient de terme font.

Per tant, l'Eq. 20 queda reescrita de la següent manera, com es mostra en (Eq. 21).

$$\rho c_p\left(x, t, T, \frac{\partial T}{\partial x}\right) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{1}{r(x)} \frac{\partial}{\partial x} \left(r(x) \cdot k\left(x, t, T, \frac{\partial T}{\partial x}\right) \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \dot{q}_v\left(x, t, T, \frac{\partial T}{\partial x}\right) \quad (\text{Eq. 21})$$

Es veu com, amb el paràmetre $m=1$, l'equació queda directament descrita en coordenades cilíndriques. Passant el terme del Laplacà del terme dret al terme esquerre, l'Eq. 17 pren finalment la forma de l'Eq. 21.

Un cop introduïda la forma general de PDE per a la funció *pdepe*, es descriurà la pròpia funció. És una funció de MATLAB que s'ha fet servir en aquest primer estudi unidimensional ja que està expressament dedicada a resoldre geometries unidimensionals. La línia de codi que defineix la funció és la següent.

```
sol = pdepe(m, @pdef, @pdeic, @pdebc, xmesh, t40);
```

Cada un dels termes dins del parèntesi conformen el grup d'arguments que la funció rep per a obtenir la solució de l'equació diferencial que se li planteja. Aquests vénen descrits a continuació en la taula 2.4.

TAULA 2.4. Arguments de la funció pdepe

Paràmetre	Descripció
m	Paràmetre corresponent a la simetria del problema. "m" pot prendre els següents valors: - m=0 per a simetria plana - m=1 per a simetria cilíndrica - m=2 per a simetria esfèrica
@pdef	Funció que defineix els coeficients de la PDE
@pdeic	Funció que defineix les condicions inicials, això és, la primera de les temperatures en la llista de l'arxiu Excel.
@pdebc	Funció de les condicions de contorn. Això és, la llista de temperatures a l'extrem exterior del condensador i les característiques de temperatura i flux de calor de l'extrem interior
t40	Vector de temps que s'ha definit per especificar els temps en què es demana la solució numèrica, per a cada valor de xmesh.
xmesh	Malla unidimensional que s'ha definit per especificar els punts on es demana la solució numèrica, per a cada valor a t40.

Així doncs, un cop introduïda la funció i la forma de PDE que descriu, es definiran i s'explicaran els diferents arguments descrits en la taula anterior.

2.5.1.2. Definició dels paràmetres

Paràmetre m

En ser una simetria cilíndrica, el paràmetre m simplement s'ha definit com a m=1. La funció pdepe rep aquest paràmetre i aplica els algorismes corresponents per a la solució d'una PDE parabòlica.

Paràmetre @pdef

Aquest és el paràmetre més rellevant de la funció, doncs és el responsable de definir els coeficients de l'equació diferencial per a resoldre-la.

En la taula 2.5. en aquesta pàgina es mostren els valors de les magnituds que s'han fet servir per a l'anàlisi tèrmic. Es tenen quatre materials, alumini, paper xop en electròlit, òxid d'alumini (dielèctric) i finalment l'aïllant tèrmic (Polipropilè, PP).

Per a obtenir els valors de les magnituds de l'electròlit, en ser una combinació de paper i àcid bòric, s'han fet servir les magnituds d'un i d'un altre segons la rellevància de les magnituds per separat en el model final. Això és, per a establir el valor de la densitat, per exemple, s'ha fixat el valor superior, que és el de l'àcid bòric. Pel que fa al calor específic, en ser semblants, s'ha fixat el valor mig dels dos i, finalment, per la conductivitat tèrmica s'ha fet servir la de l'àcid pel fet que és major, i per tant, segur que serà necessàriament superior l'energia necessària per augmentar la temperatura del conjunt.

TAULA 2.5. Propietats dels materials. [24] [25]

Magnitud		Unitats	Alumini	Dièlèctric	Aïllant tèrmic (PP)	Electròlit
Densitat	ρ	$\frac{kg}{m^3}$	2700	3980	900	2460
Calor específic	c_p	$\frac{J}{kgK}$	897	718	1920	1181
Conductivitat tèrmica	k	$\frac{W}{mK}$	205	30	0.17	27.4

A part, com s'ha definit en la secció 2.5.1. hi ha el terme font, que es defineix com la potència dissipada per unitat de volum. Per a fer servir un o altre valor de densitat, un o altre valor de calor específic, en definitiva, per saber quin material i per tant quins valors de magnituds s'han de fer servir, la funció pdepe utilitza una coordenada "x" i un instant de temps "t" arbitraris per a que, amb línies de codi informàtic, s'associïn i es donin valors a ρ , c_p , k i al terme font. Caldrà definir l'estructura interna del model, i això es farà en el proper apartat 2.4.1.3.

Paràmetre @pdeic

Com s'ha comentat abans, el paràmetre @pdeic defineix les condicions inicials de la variable temperatura. Per tant, defineix la temperatura a la qual l'estudi comença. Això és, la primera de les temperatures dels arxius Excel. Amb una línia de codi es defineixen les condicions inicials. Veure ANNEX A - CODI MATLAB.

Paràmetre @pdebc

En general, les condicions de contorn venen a definir la temperatura externa al llarg del temps, per tant és una funció temporal.

Més concretament, el que es defineix en les condicions de contorn són el valor de la temperatura i el del flux de calor en els extrems del domini de simulació. Això és, els punts a la dreta (r, "right") i a l'esquerra (l, "left") d'un eix imaginari que representen el centre i el punt més extern del condensador. Per tant, la funció defineix els valors de la temperatura i el seu flux en aquests dos punts.

Se simbolitza com segueix:

- pl : Valor de la variable d'anàlisi (temperatura) a l'extrem esquerre del domini, això és el valor de la temperatura al centre.
- ql : Valor del flux de temperatura a l'extrem esquerre del domini.
- pr : Valor de la temperatura a l'extrem dret del domini, que són les dades que s'obtenen dels arxius Excel.
- qr : Valor del flux de temperatura a l'extrem dret del domini.

Per simetria cilíndrica, el terme ql és 0, i la funció pdepe automàticament ignora qualsevol valor donat a pl , per tant, es defineix també a 0. Mentre que els termes r "right"; tenim pr , que és el valor de la temperatura a l'extrem dret (condició de contorn), i el terme qr de flux que és igualment 0, ja que en l'extrem exterior es considera que no hi ha intercanvi de temperatura amb l'ambient.

Tots aquests valors que depenen del temps, com la potència o la temperatura externa, es prenen fent servir la funció interp1 de MATLAB. El que fa és interpolar, pel valor de t arbitrari que proposa pdepe, en els vectors on apareix la potència i la temperatura, que són proporcionats en el codi.

2.5.1.4. Procediment de codi MATLAB - Condensador MULTICAPA

El model, realista, consta d'un esquema acurat de les capes internes del condensador (figura 2.6.), tenint en compte les armadures (alumini), el material dielèctric (òxid d'alumini) i l'electròlit (paper xop en àcid bòric). El material extern aïllant tèrmic s'afegeix en l'última capa del condensador.

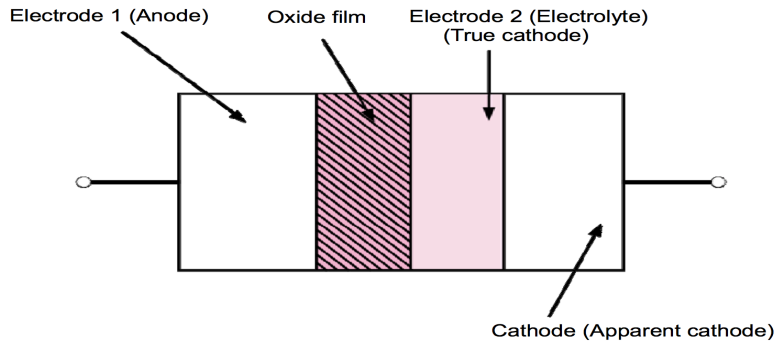


Figura 2.6. Esquema intern del condensador multicapa.

El codi és responsable d'assignar valors a les magnituds depenent d'on es trobi la coordenada x que la funció *pdepe* fa servir arbitràriament per a resoldre l'equació. Cada una de les posicions en x tindrà valors de ρ, c_p, k i terme font associats.

Seguidament s'ha definit un vector de límits que delimiten les capes seguint l'estructura de la figura 2.6. S'ha determinat un nombre de capes internes de vint-i-cinc, cada una d'aquestes capes està subdividida en quatre subcapes. El nombre de capes s'ha determinat tenint en compte el temps de computació necessari per a la simulació. Tenint en compte els gruixos típics d'una capa d'un condensador (de l'ordre de micres) es poden tenir de l'ordre de mil capes internes. Aquesta simplificació de vint-i-cinc capes pot comportar que els resultats no siguin el més propers a la realitat possible, però almenys s'ha intentat simular l'estructura interna real. D'haver intentat simular les mil capes internes, el temps necessari hauria estat tant elevat que no hauria fet possible el desenvolupament del projecte.

La malla unidimensional en aquest cas és de tres-cents punts en direcció x (radial). A continuació, en el codi, s'han definit les funcions de coeficients, de les condicions de contorn i de les condicions inicials, tenint en compte les divisions internes, que només influiran a la funció de coeficients. Veure ANNEX A - CODI MATLAB.

Finalment, per a recollir els resultats de les simulacions unidimensionals hi ha una part de codi que s'encarrega de obtenir les gràfiques més rellevants.

2.5.2. Simulacions bidimensionals (2D)

Les simulacions bidimensionals s'ha portat a terme fent servir una altra funció que dóna MATLAB per a l'anàlisi tèrmic de l'equació de la calor. En el cas de 1D la funció *pdepe* era suficient perquè només tenia en compte una variable espacial (x), mentre que per a l'anàlisi 2D és suficient.

La funció que s'ha fet servir en aquest cas és la *solvepde* que, ara sí, permet geometries 2D i 3D.

2.5.2.1. La funció MATLAB “solvepde”

En aquest cas, la forma d'equació diferencial que segueix la funció solvepde és la que mostra l'equació (Eq. 22).

$$m \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + d \cdot \frac{\partial u}{\partial t} - \nabla \cdot (c \nabla) + a \cdot u = f \quad (\text{Eq. 22})$$

Es veu com hi ha variacions respecte del model que seguia la funció pdepe per 1D descrita en l'Eq. 20. Però el funcionament és el mateix, donant valors als coeficients m , d , c , a i f per a obtenir un model de PDE i resoldre l'equació de la calor bidimensional.

Cal remarcar que aquí, també, tots els coeficients són funció de les mateixes variables de què eren els coeficients de pdepe, és a dir, poden ser funció de les coordenades espacials (x i y) del temps (t) i de les derivades espacials ($\partial u/\partial x$ i $\partial u/\partial y$).

Per a comparar els coeficients de solvepde i pdepe es presenta la taula 2.6.

Taula 2.6. Comparació de paràmetres en les equacions 20 i 22

Equació 20	Equació 22	Definició	
c	d	$\rho c_p(x, y)$	Coefficient de la derivada temporal primera.
f	c	$k(x, y)$	Coefficient de conductivitat tèrmica, de la derivada espacial segona.
s	f	$\dot{q}_v(x, y, t)$	Coefficient de terme font.

Es dedueix que el valor dels coeficients “m” i “a” són 0 per a que prengui la forma de l'equació de la calor. El terme m de la funció pdepe, no confondre amb el de la funció solvepde, representava el tipus de coordenades que es feien servir, en aquest cas, la funció directament amb la geometria del problema ja aplica el sistema de coordenades més adient per a la resolució del problema.

2.5.2.2. Procediment de codi MATLAB – CONDENSADOR MULTICAPA

A diferència de pdepe, solvepde necessita l'entrada de les dades, de les variables, dels coeficients, i de les condicions inicials i de contorn en línies de codi separades mitjançant la nomenclatura que s'introduirà a continuació.

Primer de tot s'ha de definir una malla (“*mesh*”) que servirà per a donar els punts en què la solució numèrica es calcularà. Un cop tenim els punts espacials, es defineix un vector temporal, que igual que en pdepe, consistirà en els temps dels arxius Excel. Així tindrem el nombre d'instants en què es calcularà la solució.

```
% DEFINICIÓ DE LA MALLA
msh = generateMesh(pdem2,'Hmax',(radius/capes)*0.5);
% longitud màxima dels segments de la malla Hmax
```

Tot seguit es defineixen les condicions inicials que, com abans, són la primera temperatura del vector de temps.

```
% CONDICIONS INICIALS
setInitialConditions(pdem2,Tinitial);
```

I així també les condicions de contorn. A partir del vector de temps, la funció solvepde cridarà aquest vector i, interpolant el temps discret que solvepde fa servir per la resolució, obtindrà la temperatura a la que es troba el contorn extern en aquell instant de temps.

```
% CONDICIONS DE CONTORN
bcfun = @(region,state) interp1(t40,Temp40,state.time,'linear','extrap');
applyBoundaryCondition(pdem2,'dirichlet','Edge',1:4,'u',bcfun);
```

La definició de variable de contorn ‘dirichlet’ es deu a que és aquest tipus de variable de contorn el que defineix el valor de la variable en sí, i no el valor de la seva derivada, ni altres. Com que el que volem és definir la variable en sí, la temperatura, aplicam una condició de contorn del tipus ‘dirichlet’. Ara és el moment de definir els coeficients de la PDE a resoldre.

```
% ESPECIFICACIÓ DE COEFICIENTS PER A LA PDE
specifyCoefficients(pdem2,'m',0,'d', @dcoeff,'c', @ccoeff,'a',0,'f', @fcoeff);
```

Finalment, un cop introduïts tots aquests valors, paràmetres i condicions, és el moment de la solució numèrica mitjançant la funció solvepde. A la qual se li passa el model tèrmic format per les condicions anteriors i un vector de temps.

```
% SOLUCIÓ NUMÈRICA
result2 = solvepde(pdem2,tlist);
```

El resultat de tot aquest procés de codi informàtic és una matriu $M \times N$ on “M” és el nombre de files, corresponent al nombre de nodes en què s’ha obtingut la solució numèrica de la temperatura i “N” és el nombre de columnes que correspon al nombre d’instants en el temps en què s’han obtingut els resultats. Per tant, per obtenir el valor de la solució en un instant donat, és suficient amb agafar la columna de l’instant en concret i observar els valors de cada fila, corresponent a cada node.

2.5.3. Teoria de fallades

Com tot element a la natura, els condensadors també estan sotmesos a la possibilitat de fallada. Aquesta pot venir donada per diversos motius. Podem distingir dos tipus de fallades; per una part les fallades catastròfiques, en les que inclouríem un curt-circuit o un circuit (entre d'altres), i per altra banda, la fallada per degradació amb el temps.

2.5.3.1. Fallades catastròfiques

1) Curt-circuits

Un curt-circuit entre les armadures pot ser a causa de vibracions o xocs, i esforços en els terminals, per exemple. També pot ser causat per l'aplicació de tensions majors a les de treball o pics de tensió. El curt-circuit provoca un sobrepic de corrent que fa que la temperatura augmenti provocant la fallada del condensador.

2) Circuit obert

Aquest cas pot venir donat per forces extremes aplicades al condensador en el moment de muntatge o fabricació. En tals casos esdevé un circuit obert en desprendre's alguna de les parts que componen el condensador i que van connectades a la font de corrent. També es pot provocar un circuit obert per la vaporització de l'electròlit i la conseqüent desconexió dels terminals del condensador.

3) Sobreensions

Pel fet de treballar en tensions per sobre de la nominal, el condensador pot fer-se malbé, fallant i donant un comportament elèctric i tèrmic no recomanat. La temperatura interna pot acabar augmentant, no fins el punt de curtcircuitar els terminals però sí fins el punt d'augmentar la pressió interna i provocar una fuga de l'electròlit per la capa segellant del condensador. Com a resultat, se seca l'electròlit i es produeix, també, un circuit obert.

2.5.3.2. Fallades per degradació amb el temps

Com tot altre dispositiu, els components que el conformen, estan sotmesos a un envelliment gradual en el temps que fa que les propietats físiques, tèrmiques i elèctriques es vegin deteriorades.

Per exemple, el segellant extern pot degradar-se de tal manera que, sense haver-hi hagut mai curt-circuits i/o circuits oberts, pot filtrar-se el líquid electròlit

i així sí, provocar el circuit obert, però en aquest cas la fallada hauria sigut a causa del deteriorament del segellant.

En la següent figura es mostra un esquema on es detallen la majoria de les causes i conseqüències de les fallades en condensadors electrolítics. Tots els tipus de fallades queden reflectides en aquesta figura 2.7. veient-se les causes inicials possibles, el mecanisme de fallada i la causa final de la mateixa.

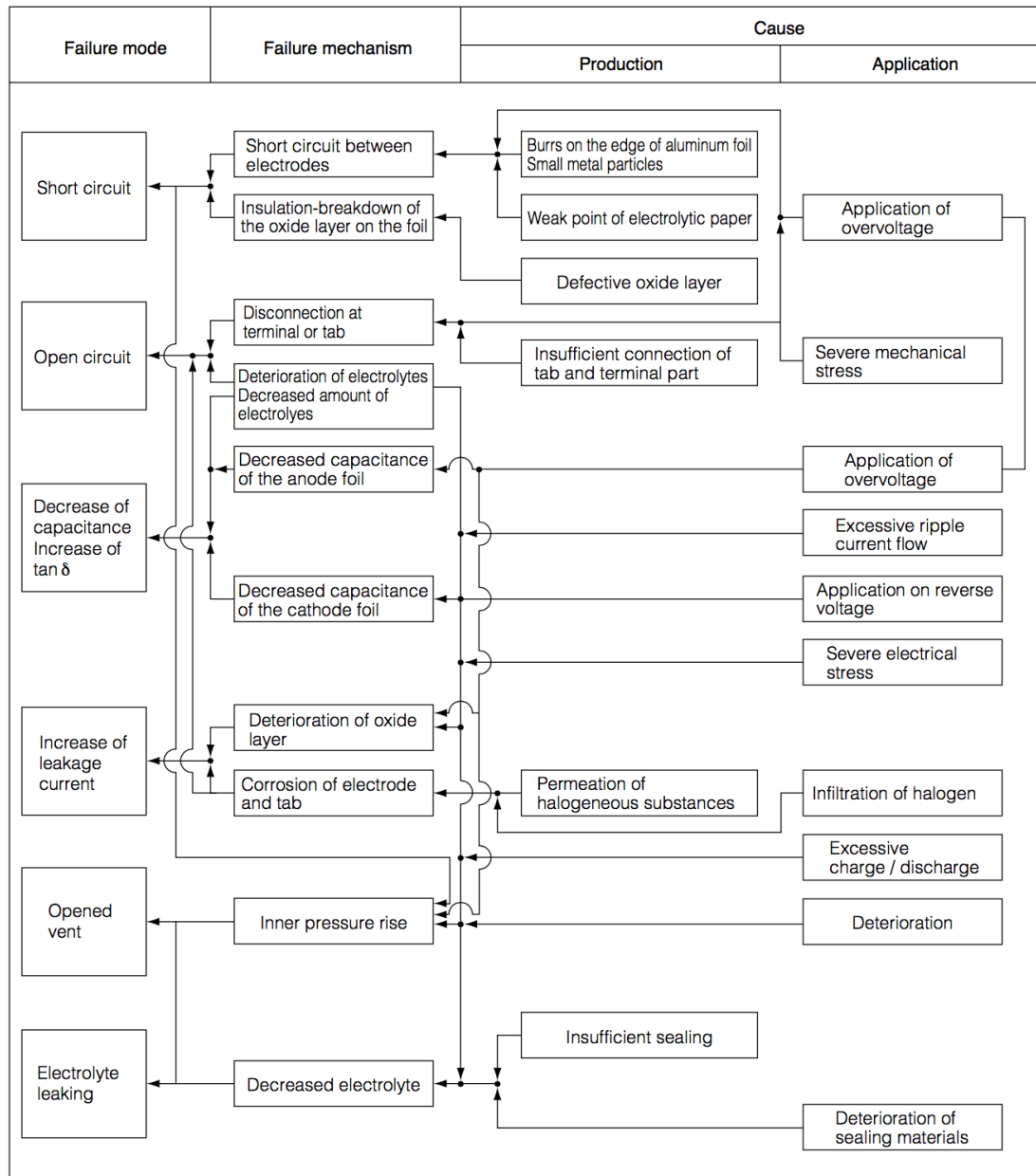


Figura 2.7. Esquema de fallades dels condensadors electrolítics

CAPÍTOL 3. RESULTATS

En aquest capítol es presentaran els resultats més rellevants de l'estudi. El primer que es farà és donar unes petites premisses que es considera que, a priori, s'han de complir.

(1) Les temperatures internes deuen ser superiors que les externes, en menor o major grau, però sempre superiors. Per tant, qualsevol perfil de temperatures en qualsevol punt de l'interior, gràficament, mai no quedarà per sota del perfil en un punt exterior.

(2) L'aspecte de les capes es veurà en les gràfiques que representin perfils de temperatura al llarg del radi, no al llarg del temps.

(3) Existeix un desplaçament en el temps de les gràfiques de temperatura enfront les de potència, doncs la transferència de temperatura no és un procés instantani sinó més bé lent. Com s'ha vist, això depèn de la conductivitat tèrmica del material.

(5) Un altre aspecte a tenir en compte és que, evidentment, a major tensió aplicada al condensador, més energia s'allibera i major serà la temperatura a què s'arribi, teòricament.

(6) La calor es transfereix des de la font de calor cap a l'exterior, és a dir, des del nucli dissipatiu cap a fora, passant per la capa externa aïllant.

Un cop establertes aquestes premisses, es passarà a introduir els diferents resultats, seguint el mateix ordre lògic que s'ha fet servir fins ara. Començant per introduir les dades d'entrada, passant per les simulacions unidimensionals i acabant pels models bidimensionals.

3.1. REPRESENTACIÓ DE LES DADES D'ENTRADA

Per a començar es presenta la figura 3.1. on es comparen els gràfics de tots els arxius tant de potència com de temperatura. Les gràfiques són una representació de les dades d'entrada dels arxius Excel, per tant són l'evolució temporal de la temperatura externa i l'evolució temporal de la potència injectada en el condensador.

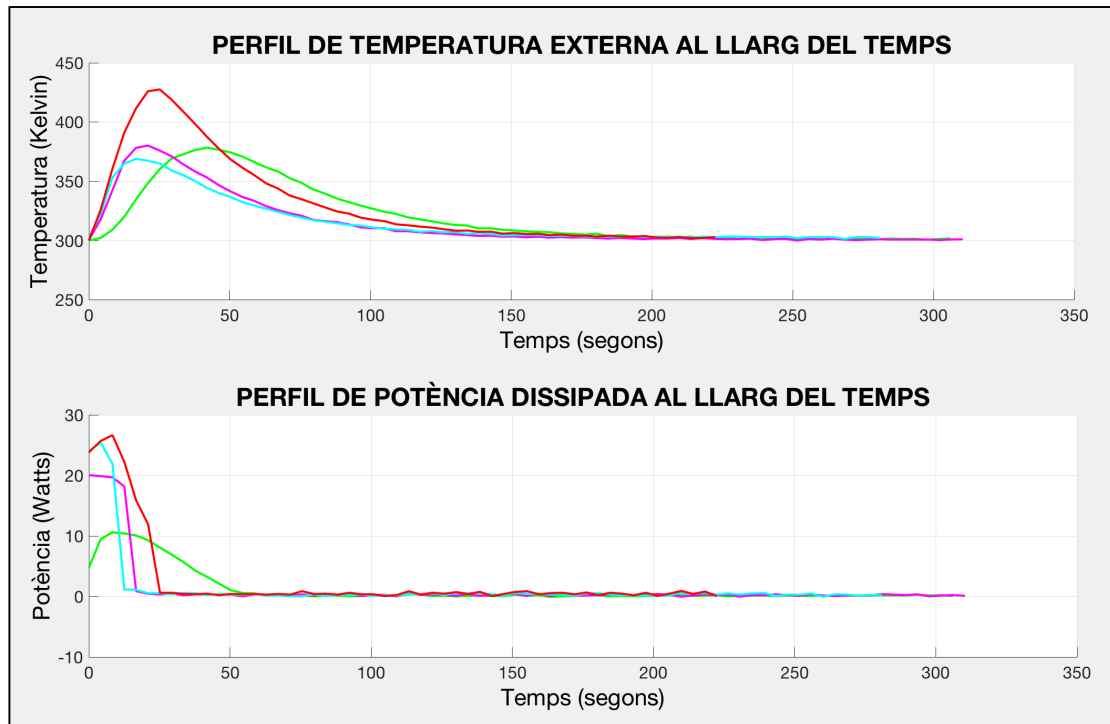


Figura 3.1. Comparació de dades de potència injectada i temperatura mesurada a la superfície

Aquí es pot apreciar com existeix aquest desplaçament temporal entre els pics de potència i els pics de temperatura. El de temperatura es dona més tard que el de la potència a causa de la conductivitat tèrmica. Es pot considerar que existeix una conductivitat tèrmica equivalent en la secció, que engloba les conductivitats tèrmiques dels tres materials, i que és la responsable d'aquest retard en el temps. La corba verda correspon al condensador que s'ha connectat a una tensió de fins a 25 V. És la menor de les tensions que s'ha aplicat, i és per això que, després del pic de potència, té una tendència decreixent no tant pronunciada com és el cas dels altres condensadors.

El principal motiu, per tant, de la caiguda sobtada de la potència en els altres casos (blau, morat i vermell, 30, 35 i 40 V respectivament) és precisament aquest, la injecció de tanta potència, per sobre de la potència o tensions nominals el que va provocar la fallada del condensador fent-lo esclatar, i així, deixant de dissipar potència.

Aquest caiguda sobtada de la potència no es veu reflectida en els perfils de temperatura pel motiu que s'ha comentat de que la transferència de calor és un procés lent, i per tant, no és immediata la caiguda de temperatura. De fet, es veu com, en cinquanta segons, quasi ja no es dissipa potència en ningun dels condensadors encara que no és fins els dos-cents segons que la temperatura no torna al seu valor inicial.

Un cop introduïdes les dades d'entrada de forma gràfica, es passarà ja a discutir per separat els resultats mantenint l'ordre que s'ha seguit per a descriure els casos en els apartats anteriors.

3.2. RESULTATS DE LES SIMULACIONS UNIDIMENSIONALS (1D)

Pel cas de les simulacions unidimensionals, com ja s'ha comentat, s'ha estudiat un model multicapa, compost per capes alternades d'alumini i dielèctric.

3.2.1. Resultats del model multicapa (1D).

El model presenta un perfil de temperatures separat del de l'exterior del condensador. Això és a causa de l'estructura interna i de la configuració de materials que componen l'interior del condensador. El fet que hi hagi materials amb alta i altres amb baixa conductivitat tèrmica provoca que, esglaonadament, la temperatura vagi augmentant a mesura que ens apropem al centre de la secció.

Els següents apartats mostraran els perfils de temperatura per a cada tensió aplicada, que igualment, va de 25 V a 40 V.

3.2.1.1 Tensió aplicada de $V_{cc} = 25$ V.

Per al condensador a 25 V s'han obtingut els següents perfils de temperatura interna i externa (figura 3.2.), seguint el model multicapa.

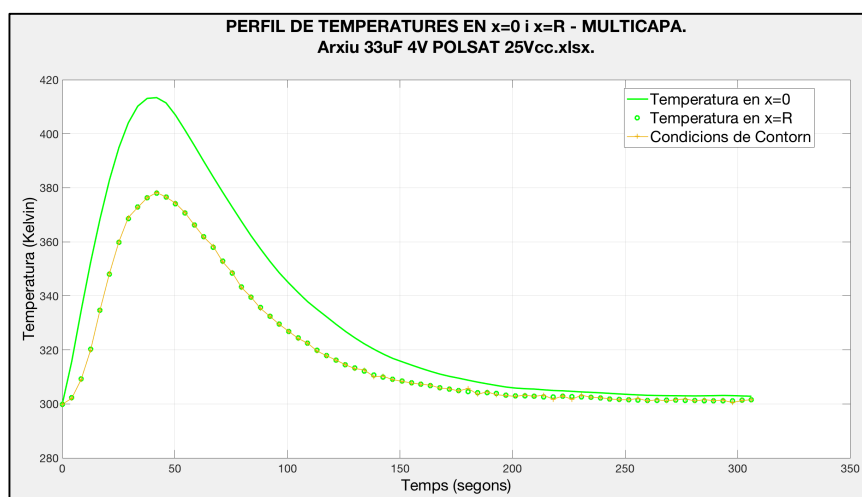


Figura 3.2. Perfil de temperatures interna i externa a la tensió de $V_{cc}=25$ V.

S'observa com apareix una diferència de temperatures entre el centre i l'exterior del condensador. Això és a causa de les capes de diferents materials que dificulten la transferència de calor des del centre cap a l'exterior. Sempre, el perfil interior estarà per sobre de l'exterior, però acabaran acoblant-se quan ja no se dissipï més potència i s'arribarà, llavors, a un equilibri tèrmic arreu del condensador. També s'ha obtingut un perfil, en la figura 3.3. que mostra el comportament tèrmic al llarg del radi. Es presenta una figura amb dos imatges, on la segona correspon a un augment de la primera cap a la zona interna del condensador, deixant de banda la capa aïllant exterior i fixant-se en el comportament de les capes dissipatives.

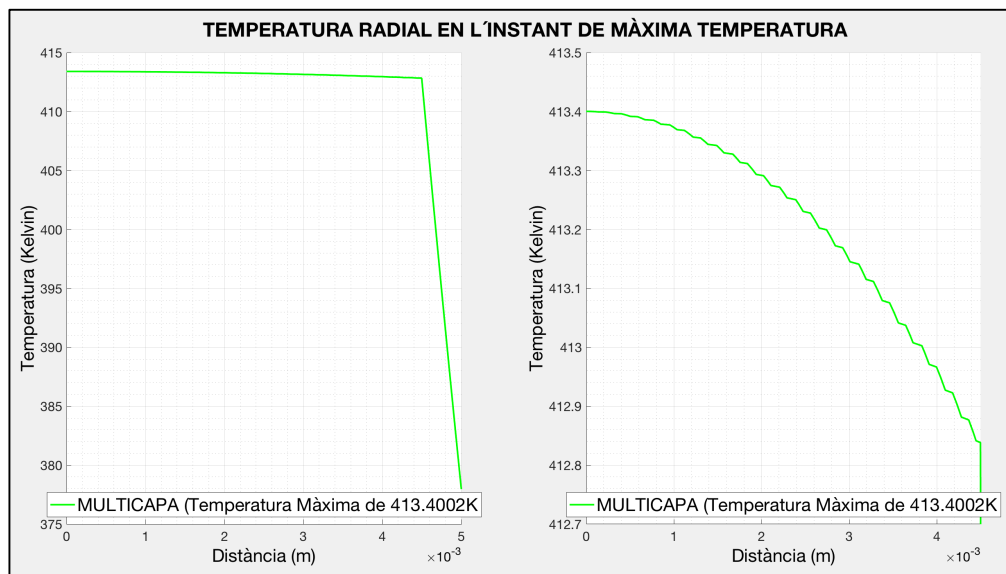


Figura 3.3. Perfil de temperatures radial en instant de temperatura màxima ($V_{cc}=25\text{ V}$)

S'observa, en la imatge de la dreta, com la tendència de la temperatura interna és exponencial negativa i que és a partir de la capa aïllant tèrmica que la temperatura decreix bruscament. S'ha arribat a una temperatura de 413 K.

3.2.1.2 Tensió aplicada de $V_{cc} = 30\text{ V}$.

Els resultats per la tensió de 30 V han sigut similars a diferència de, com es preveia, la temperatura màxima assolida que ha sigut major. La figura 3.4. mostra el perfil de temperatures interna i externa per al condensador a 30 V.

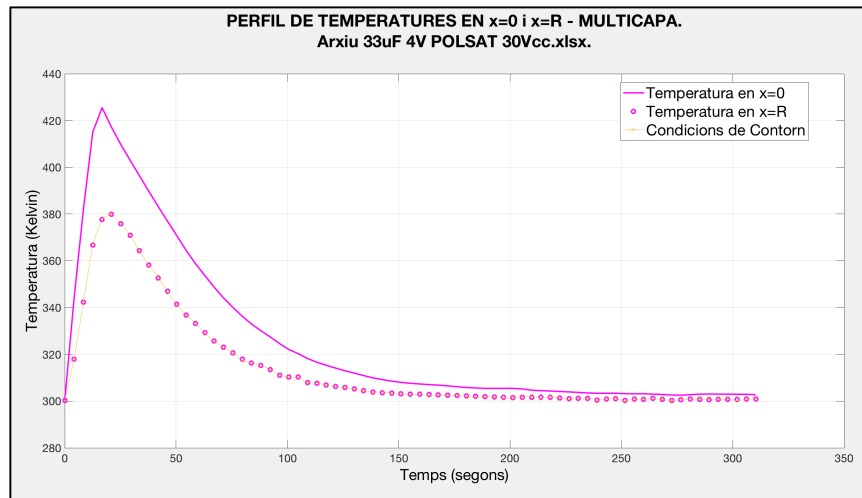


Figura 3.4. Perfil de temperatures interna i externa a la tensió de $V_{cc}=30$ V.

S'ha obtingut el mateix comportament que per la tensió de 25 V. I també, amb els perfils de temperatura al llarg del radi presentats en la següent figura 3.5, s'ha obtingut la mateixa tendència exponencial negativa.

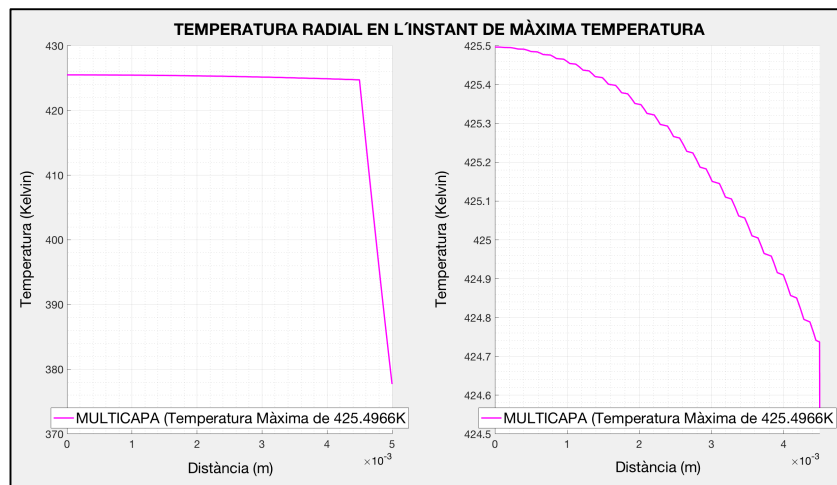


Figura 3.5. Perfil de temperatures radial en instant de temperatura màxima ($V_{cc}=30$ V)

En aquest cas, s'ha superat la temperatura assolida per a la tensió de 25 V i s'han arribat als 425.5 K, com s'esperava.

3.2.1.3 Tensió aplicada de $V_{cc} = 35$ V.

Es va augmentant la tensió i ara s'apliquen 35 V al condensador. Igualment s'han obtingut resultats similars llevat del fet que, en aquest cas, al contrari del que s'esperava s'ha obtingut una temperatura màxima menor a la que es tenia per a 30 V. Així i tot, el comportament tèrmic és el mateix. Les figures 3.6 i 3.7 mostren les mateixes tendència que per a les tensions anteriors

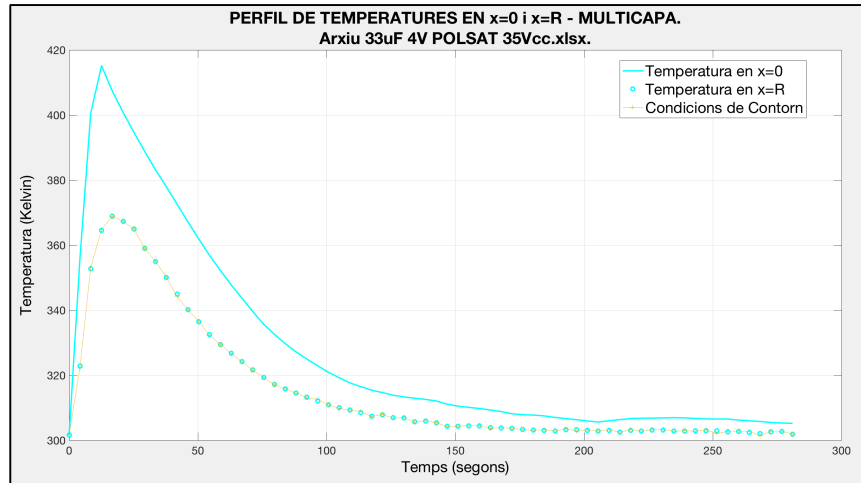


Figura 3.6. Perfil de temperatures interna i externa a la tensió de $V_{cc}=35$ V.

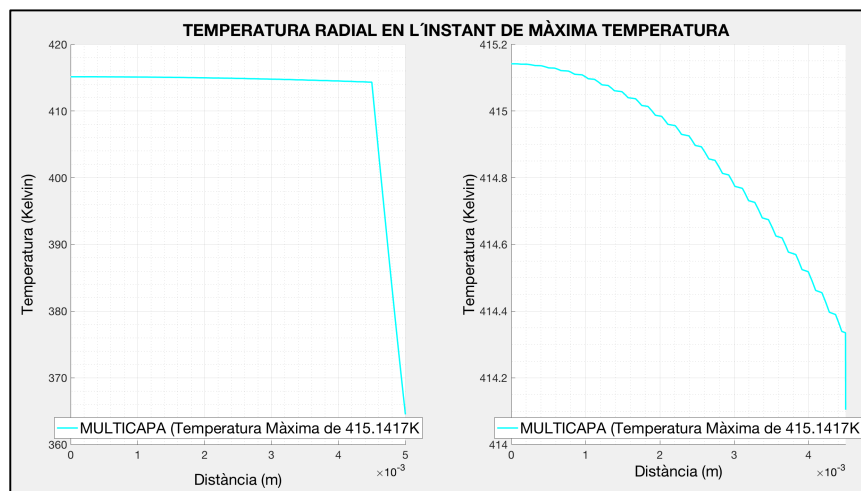


Figura 3.7. Perfil de temperatures radial en instant de temperatura màxima ($V_{cc}=35$ V)

La temperatura màxima assolida en aquest cas és d'uns 415 K, menor que en el segon cas, però superior al primer.

3.2.1.4 Tensió aplicada de $V_{cc} = 40$ V.

En aquest últim apartat, es present els resultats per a la tensió de 40 V. Igualment, s'han obtingut els mateixos resultats i s'ha assolit, ara sí, la màxima temperatura de totes les simulacions.

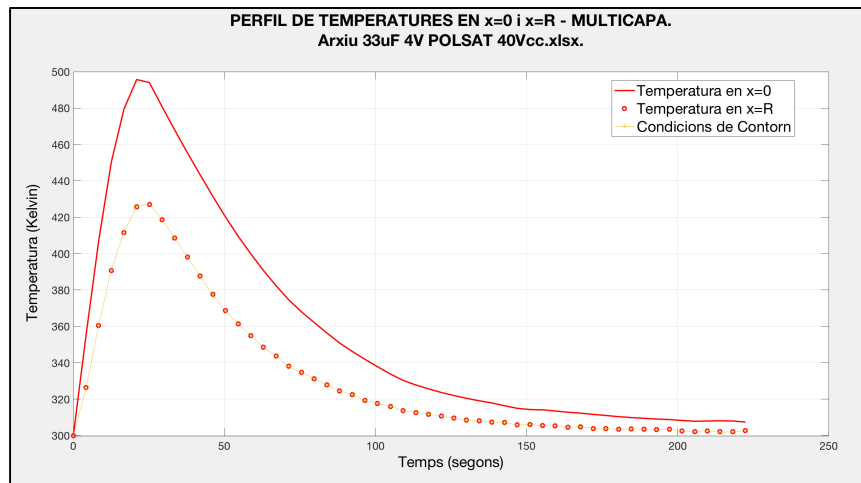


Figura 3.8. Perfil de temperatures interna i externa a la tensió de $V_{cc}=35$ V.

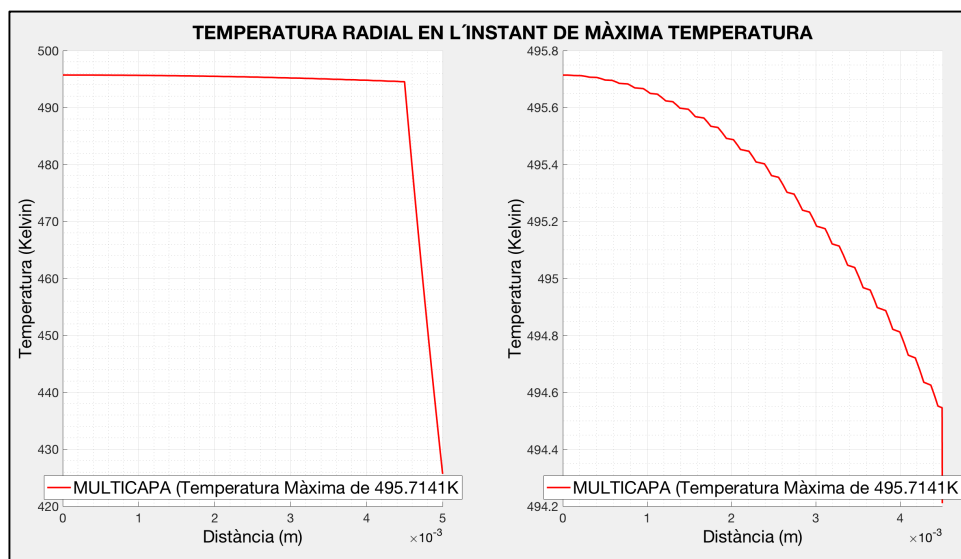


Figura 3.9. Perfil de temperatures radial en instant de temperatura màxima ($V_{cc}=35$ V)

En aquest últim cas s'ha arribat fins a una temperatura d'uns 495.7 K. Superior a qualsevol anterior.

3.2.1. Comparació de resultats del model multicapa.

En aquesta secció el que es tractarà és de veure la relació entre les tensions i temperatures màximes assolides. Ja s'ha observat que es troba una tendència

creixent entre temperatura i tensió. Ara es discutirà quin tipus de tendència és aquesta a partir de la figura 3.10.

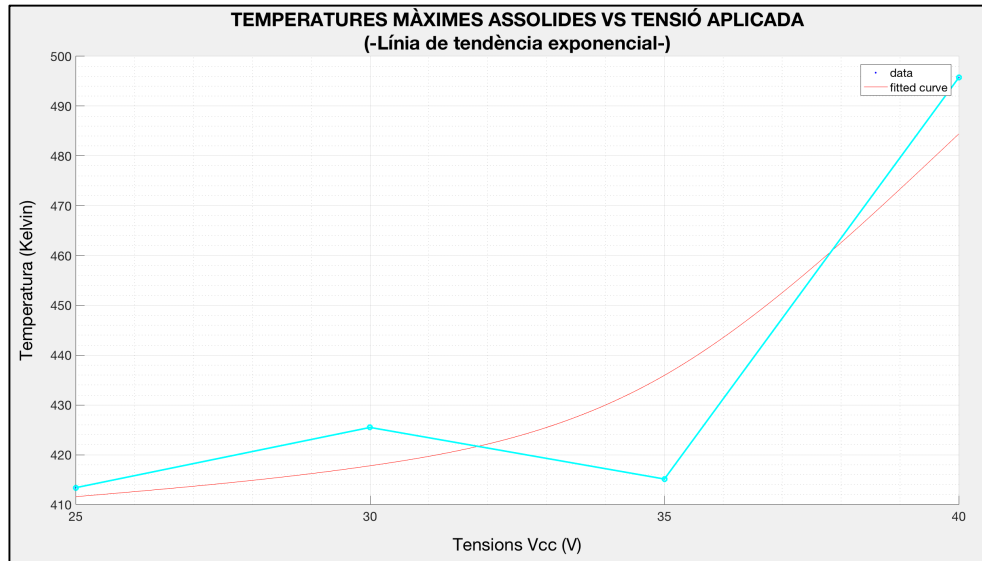


Figura 3.10. Temperatures màximes envers tensions aplicades

Es representen en un mateix gràfic les temperatures que s'han comentat abans i, llevat de la tercera tensió, els resultats segueixen un comportament exponencial. Llavors es pot afirmar que la temperatura és exponencialment proporcional a la tensió, i que a major tensió aplicada, major temperatura assolix el condensador.

3.3. RESULTATS DE LES SIMULACIONS BIDIMENSIONALS (2D)

Un cop introduïts els resultats unidimensionals, portats a terme amb funcions específiques que han analitzat una direcció radial, amb les dades d'entrada de què disposàvem, anem a analitzar el mateix problema però ara simulant no una direcció radial sinó dos dimensions, analitzarem llavors una secció circular en què, mitjançant el MEF s'han obtingut valors de temperatura en els nodes que conformen la malla d'anàlisi.

Com ja s'ha vist en l'apartat dels resultats del model unidimensional, és la configuració multicapa la que reflecteix amb més fidelitat la realitat. És per això que, per centrar-se en els resultats més vàlids, s'ha modelat directament, pel cas bidimensional, un condensador multicapa.

3.3.1. Resultats del model multicapa (2D).

En aquest cas, els resultats es representen com a seccions circulars on, segons el color, es mostra la temperatura a què ha arribat cada node.

Depenent de cada tensió, s'obtidran diferents rangs de temperatura que s'indiquen amb una barra de colors al costat dret de cada figura.

3.3.1.1 Tensió aplicada de $V_{cc} = 25\text{ V}$.

La següent figura 3.11 mostra la gràfica corresponent a l'assaig del condensador a 25 V. S'observen clarament com el pic de temperatura es dona just en el centre, deixant clara la premissa que la calor es transfereix de dins cap a fora.

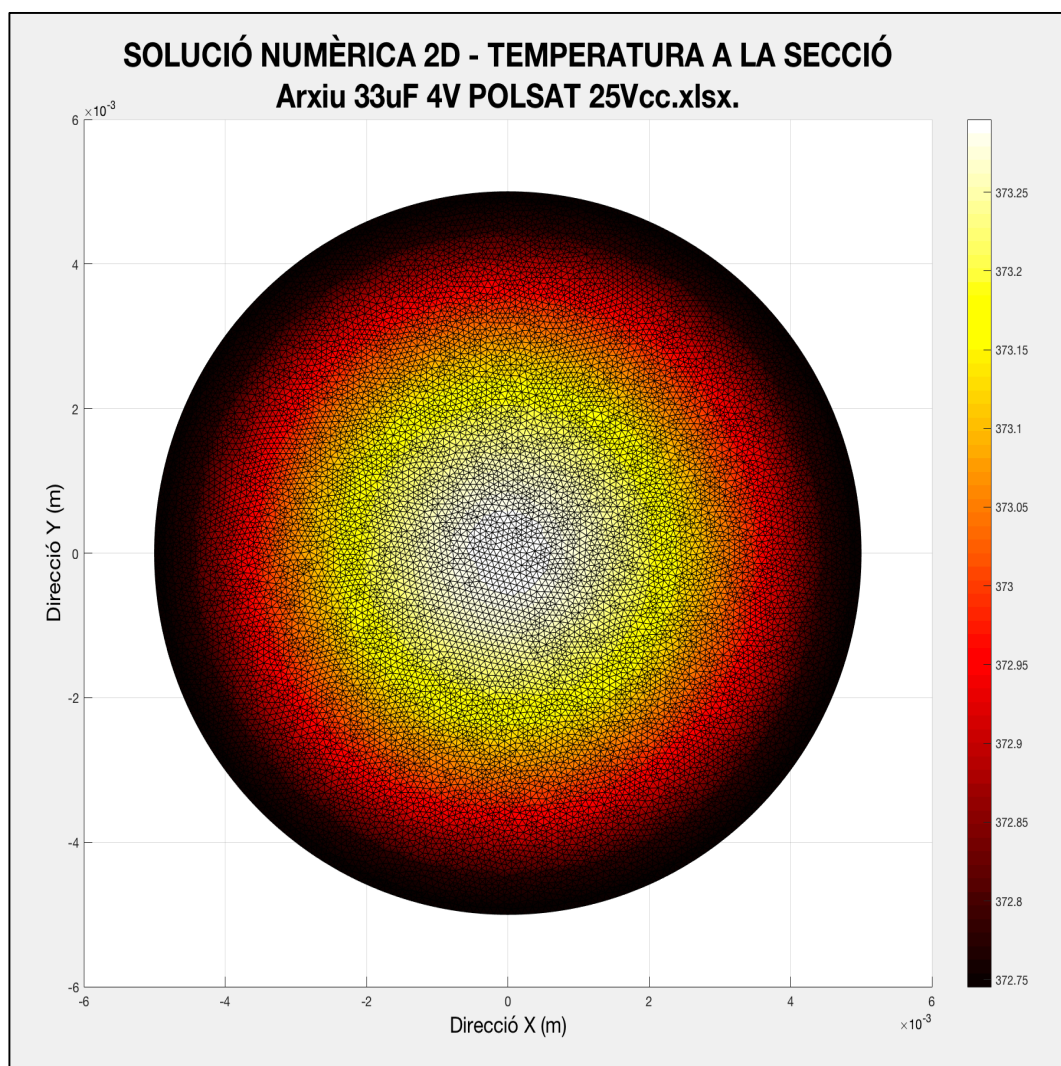


Figura 3.11. Temperatures en la secció per al condensador a 25 V (2D).

En la següent figura 3.12. es mostra una gràfica tridimensional per veure com es veu l'estructura per capes dins del condensador. S'observen els mateixos esglaons que es tenien en les gràfiques de les simulacions unidimensionals. Es veu com s'assoleix una temperatura de fins a 373 K.

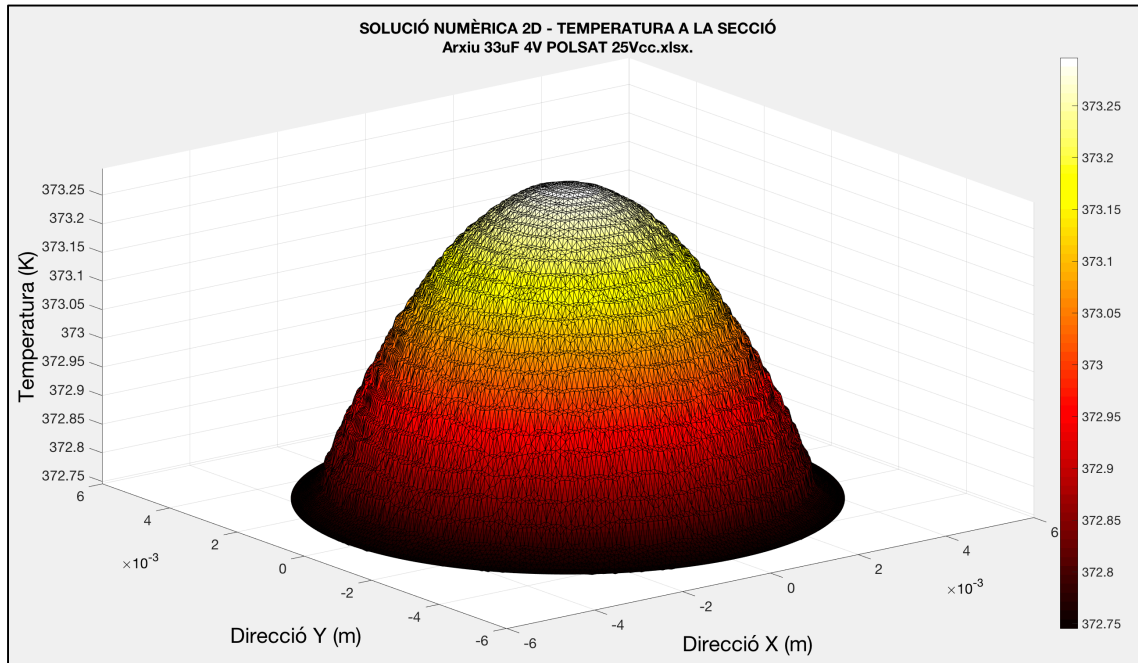


Figura 3.12. Temperatures en la secció per al condensador a 25 V (3D).

3.3.1.2 Tensió aplicada de $V_{cc} = 30$ V.

Es torna a presentar el mateix tipus de gràfica que aquella en la figura 3.13. però pel cas de tensió aplicada de $V_{cc} = 30$ V. S'observa el mateix comportament que en l'apartat anterior i s'arriba fins a una temperatura de 376 K.

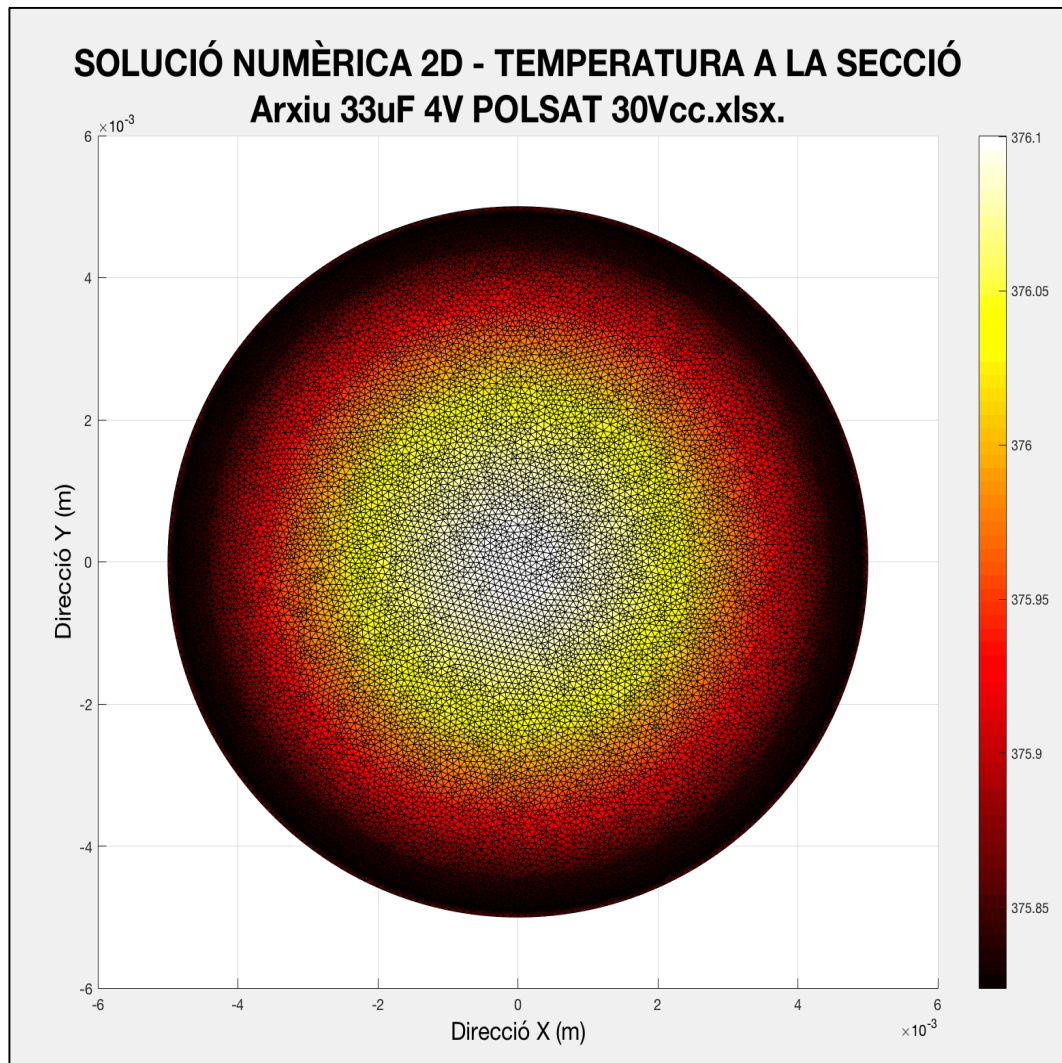


Figura 3.13. Temperatures en la secció per al condensador a 30 V.

El comportament intern en capes que es veu en la figura 3.12. es repeteix en els quatre casos, però per simplicitat per a la redacció només es presenta pel cas de 25 V.

3.3.1.3 Tensió aplicada de $V_{cc} = 35\text{ V}$.

Ara, tenint en compte que en la simulació unidimensional, el cas de que la tensió de 35 V va experimentar una baixada en la temperatura màxima assolida es repeteix en les simulacions bidimensionals. I aquí la temperatura descendeix fins als 354 K.

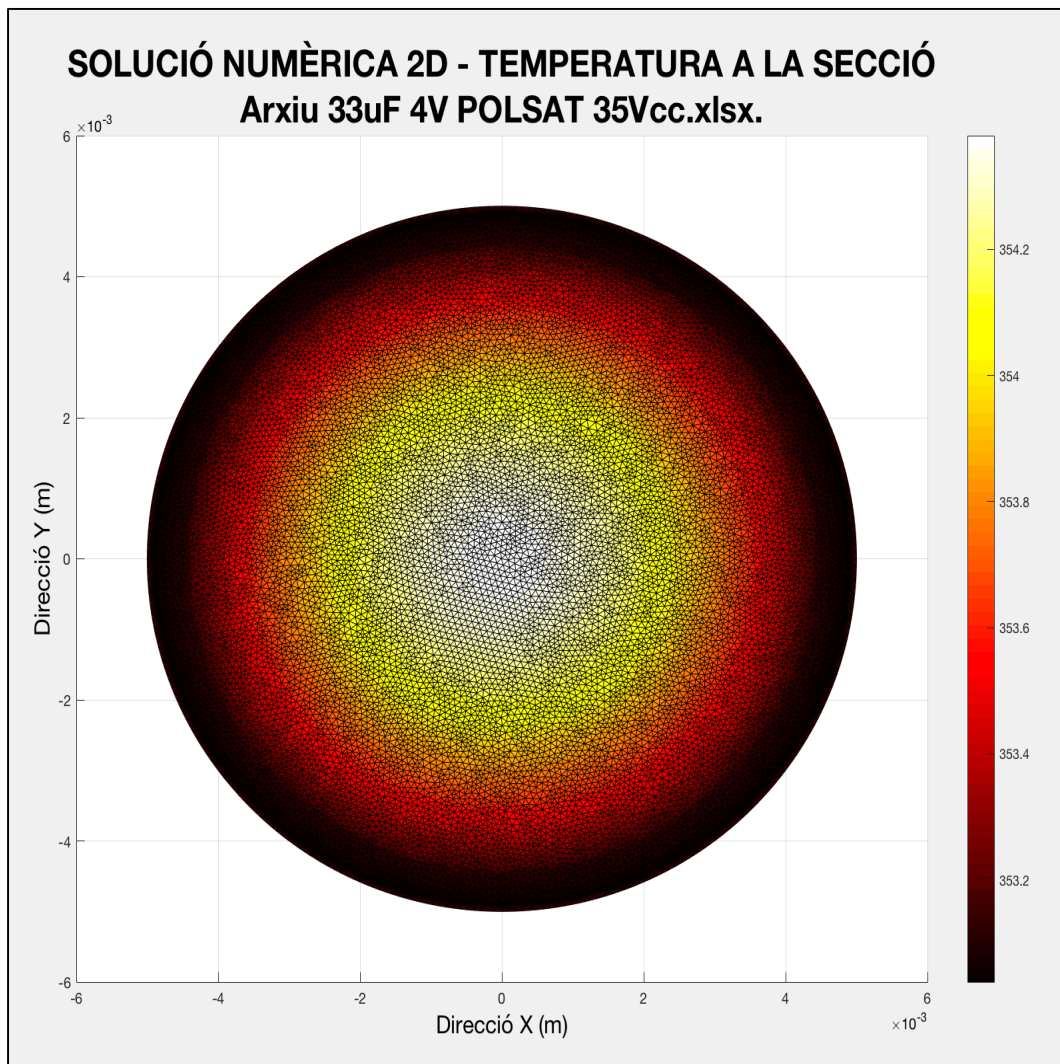


Figura 3.14. Temperatures en la secció per al condensador a 35 V.

3.3.1.4 Tensió aplicada de $V_{cc} = 40\text{ V}$.

Per últim, i recuperant la tendència creixent, es mostra la gràfica en 2D de la solució numèrica en la secció per a una tensió aplicada de 40 V. Ara, com en els models unidimensionals, s'assoleix la màxima temperatura, que en aquest cas arriba fins els 392 K.

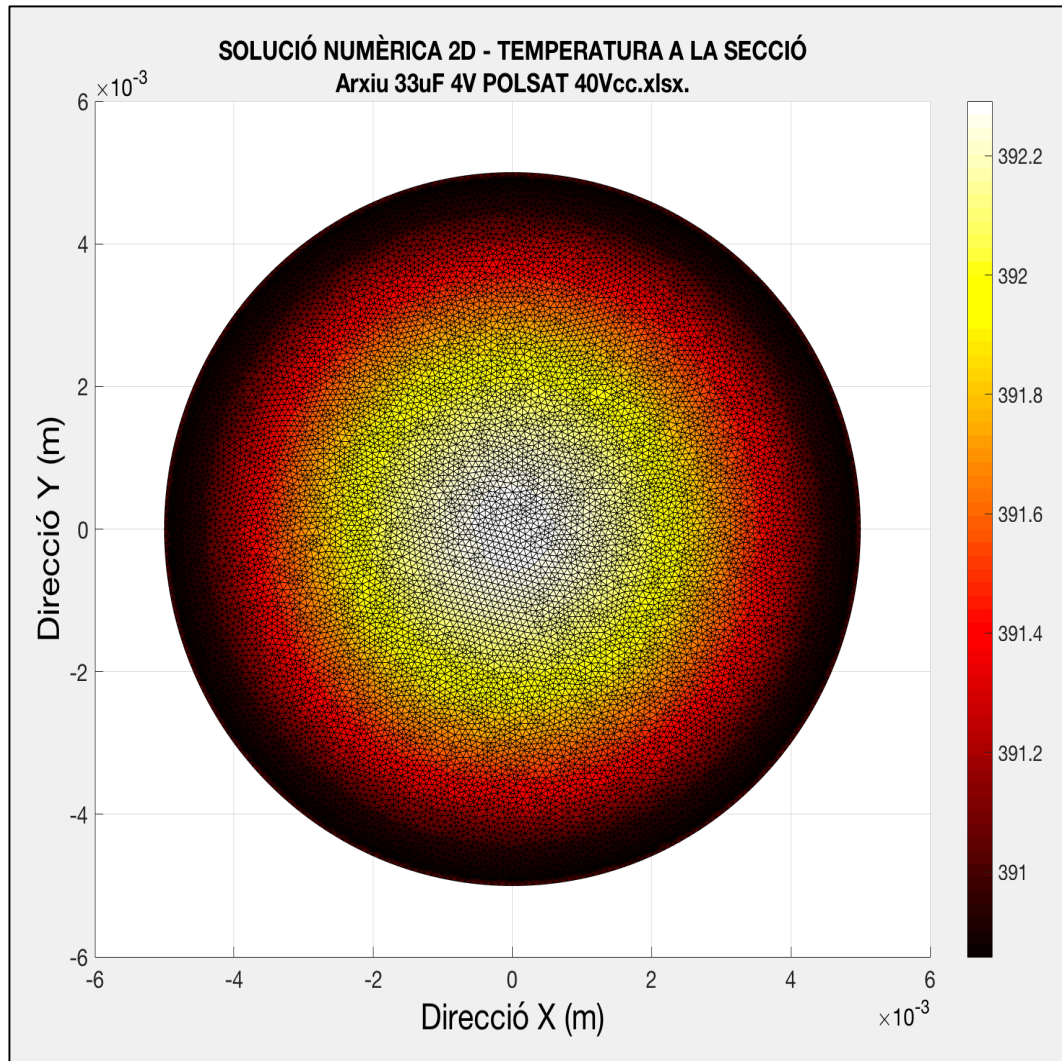


Figura 3.15. Temperatures en la secció per al condensador a 40 V.

3.4. RESULTATS D'ENTROPIA

En aquest apartat es tractarà la generació d'entropia i s'interpretaran els resultats per a concloure la degradació del condensador a partir d'aquesta entropia generada.

A partir de les solucions numèriques de temperatura i la potència de què es disposava com a dada d'entrada, s'han generat els resultats d'entropia instantània i d'entropia acumulada. Per tant, es veuran gràfiques que mostrin l'entropia instantània generada i, recordant que aquest procés d'entropia és irreversible, obtindrem també gràfiques que mostrin l'acumulació d'aquesta degradació constant.

En ser irreversible, en els resultats que mostrin la Srate global es veuran aquestes tendències creixents, sempre. Les figures 3.20. 3.21. 3.22. i 3.23 mostraran aquest comportament.

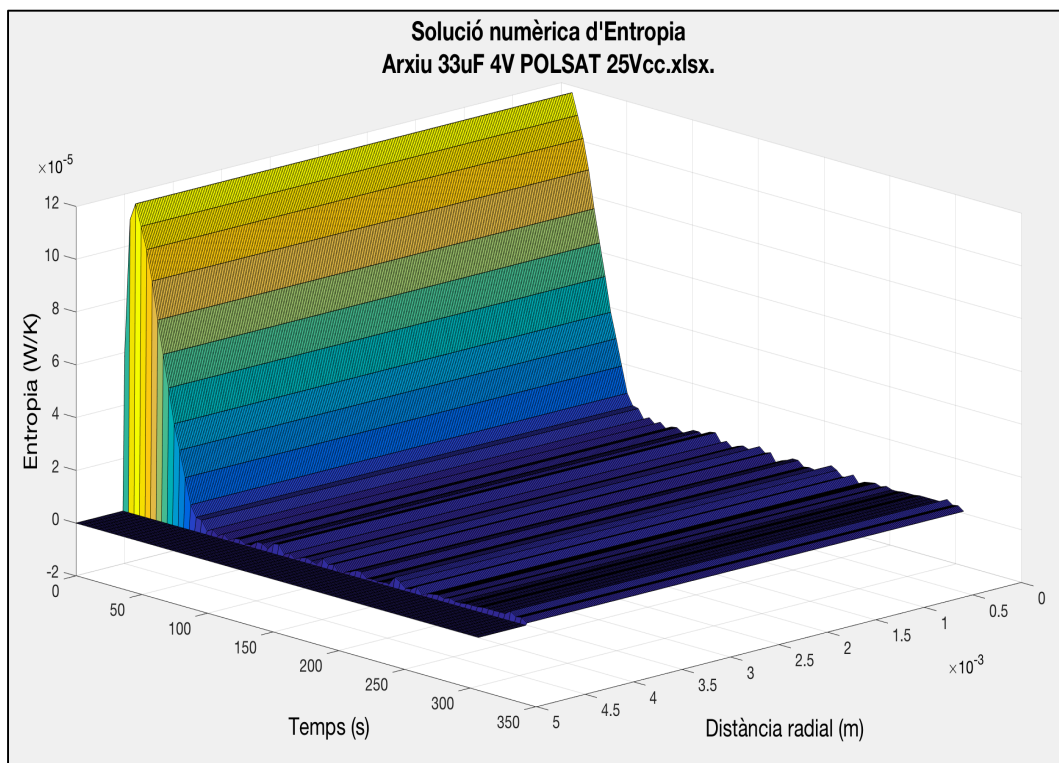


Figura 3.16. Resultats de Srate per a $V_{cc}=25$ V.

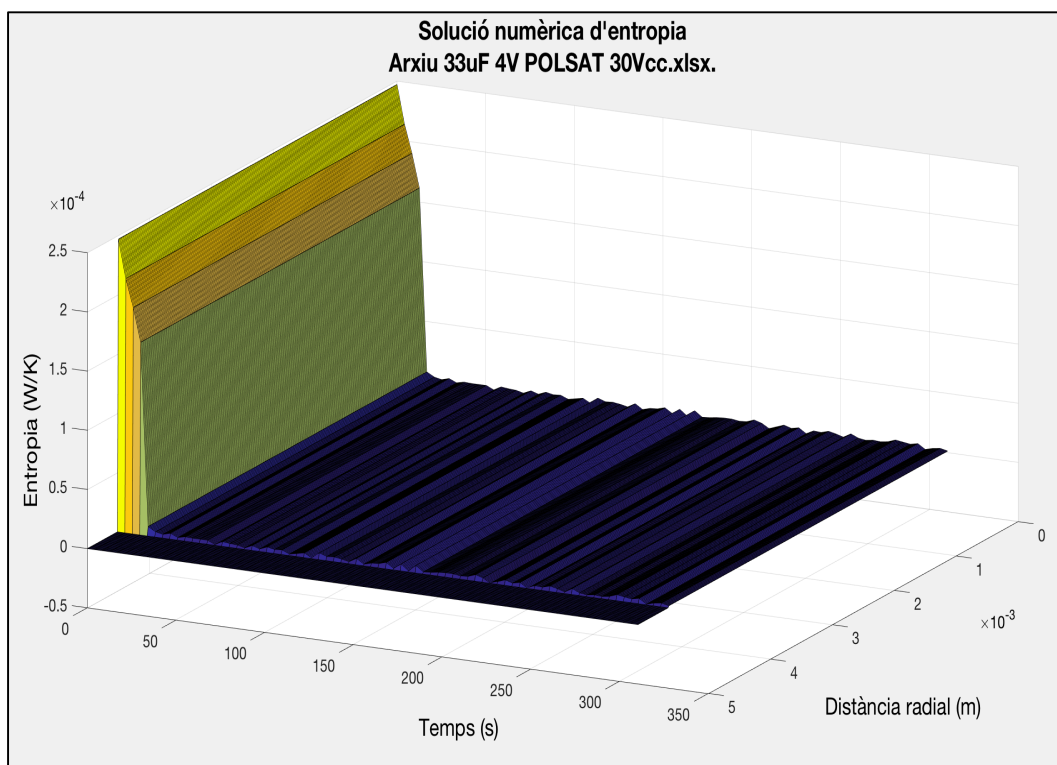


Figura 3.17. Resultats de Srate per a $V_{cc}=30$ V.

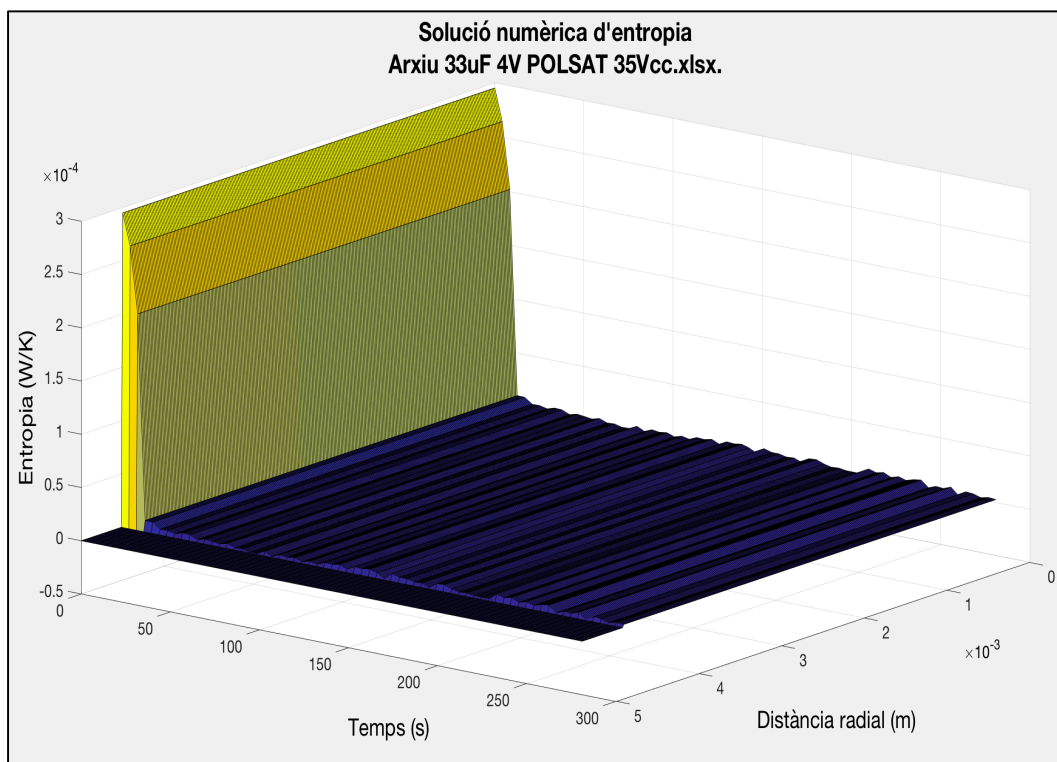


Figura 3.18. Resultats de Srate per a $V_{cc}=35$ V.

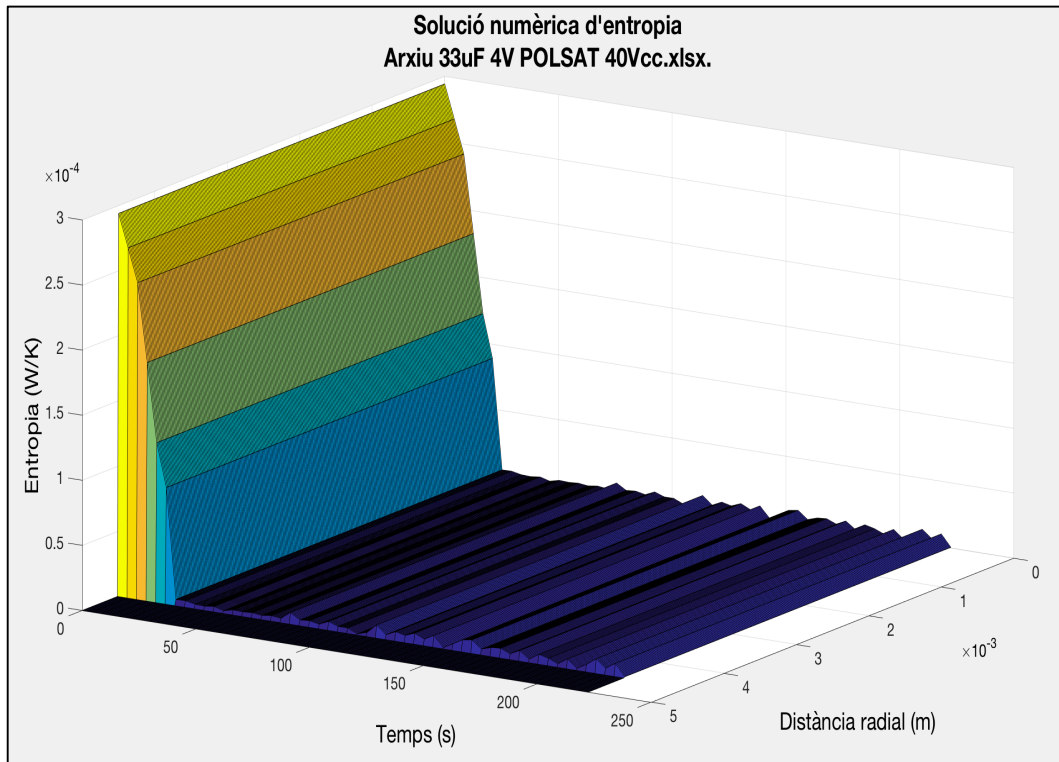


Figura 3.19. Resultats de Srate per a $V_{cc}=40$ V.

Les gràfiques de les figures 3.16. 3.17. 3.18. i 3.19. mostren aquesta generació d'entropia per a cada punt en el radi i per a cada instant de temps. Es veu una tendència decreixent perquè representa aquesta generació d'entropia en cada instant, que depèn de la potència dissipada i aquesta decreix amb el temps.

És en les gràfiques de Srate global on s'observa la tendència creixent a causa de la irreversibilitat del procés. Que sigui irreversible s'observa en el fet de que l'entropia instantània mai no serà inferior a zero, i per tant, l'acumulada sempre augmentarà.

Ara es presenten les gràfiques de Srate global, on s'observa perfectament la tendència creixent en les figures 3.20. 3.21. 3.22. i 3.23.

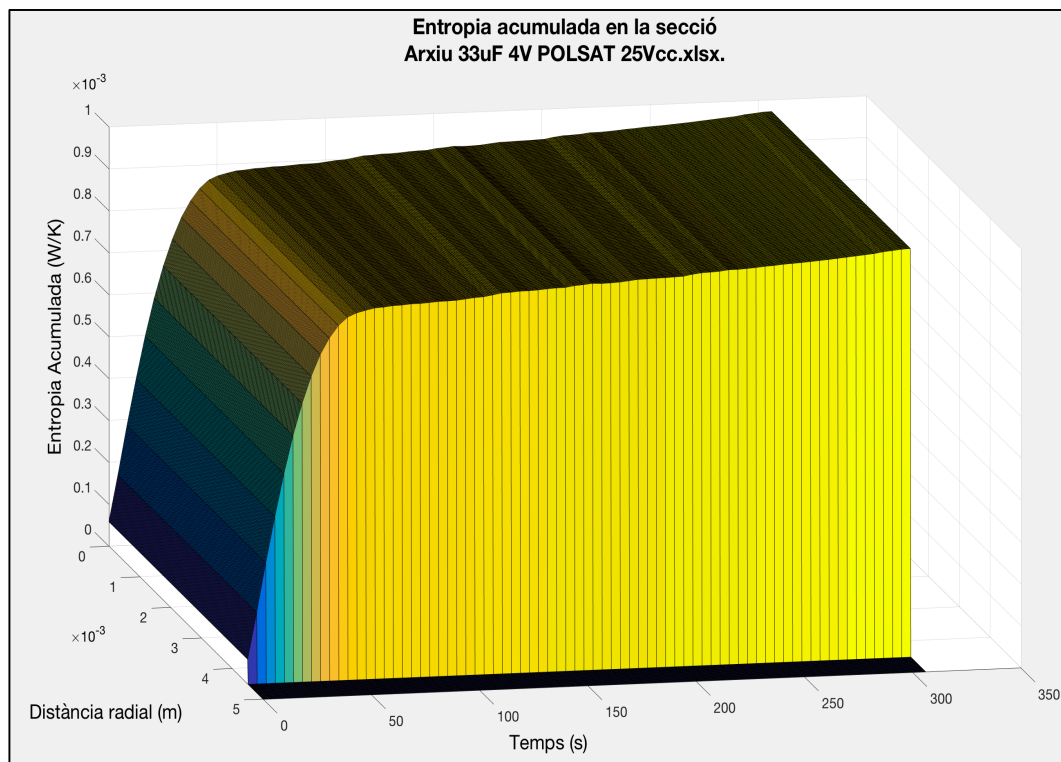


Figura 3.20. Resultats de Srate global per a $V_{cc}=25$ V.

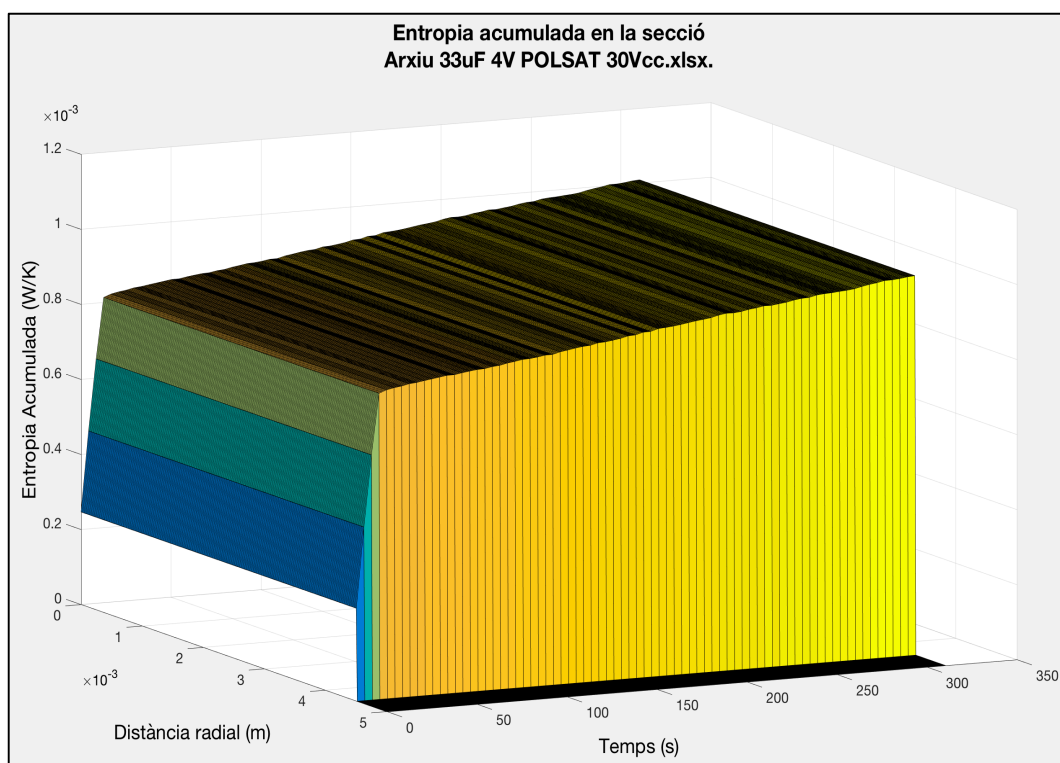


Figura 3.21. Resultats de Srate global per a $V_{cc}=30$ V.

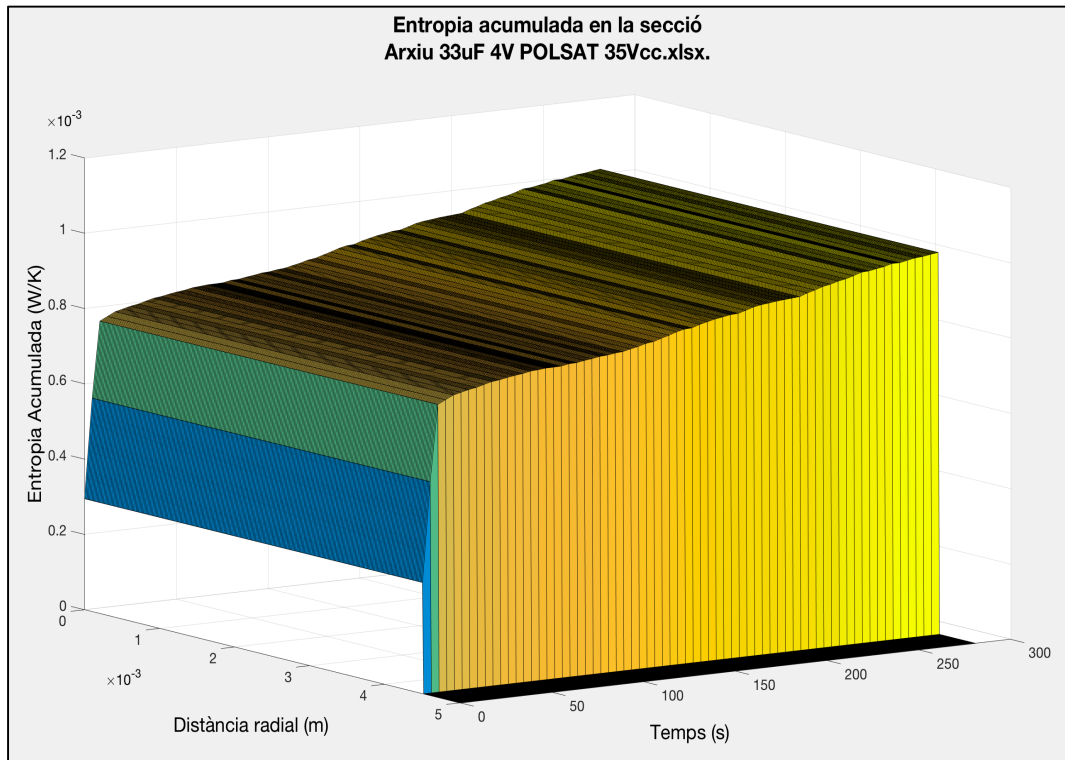


Figura 3.22. Resultats de Srate global per a $V_{cc}=35$ V.

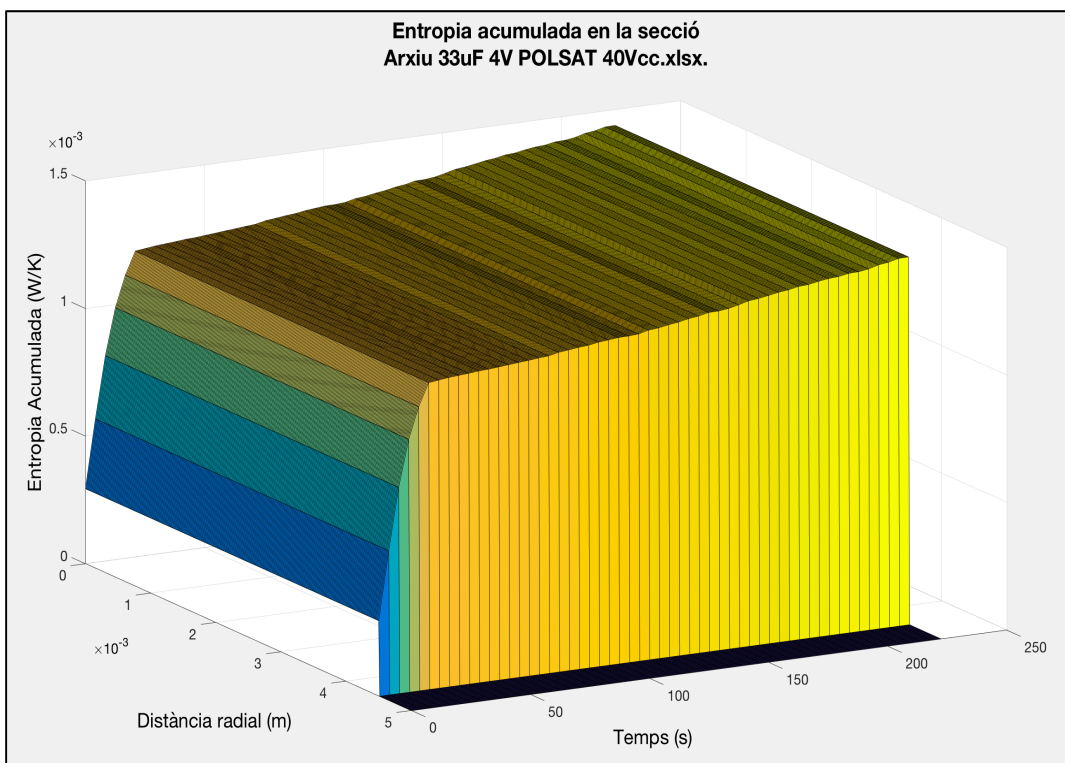


Figura 3.23. Resultats de Srate global per a $V_{cc}=40$ V.

Com s'ha vist, els condensadors es degraden depenent de la tensió aplicada. A major tensió majors nivells de degradació. S'assoleixen majors temperatures i s'hi dissipen majors potències. És un fet irreversible el que es degradi un component elèctric i més si s'hi apliquen condicions fora dels límits de treball acceptables.

CAPÍTOL 4. CONCLUSIONS

En aquest quart apartat del projecte, es presenta un llistat de les conclusions més rellevants a què s'han pogut arribar després d'haver procedit amb totes les eines i coneixements aplicats.

(1) Com a primera conclusió, podem dir que aquest ha sigut un petit projecte enfocat a donar un major coneixement sobre el comportament tèrmic i modelat de perfils de temperatura, però igualment s'ha intentat reflectir el més fidelment la realitat, simulant materials i disposicions dels mateixos dins del condensador.

(2) S'ha arribat a la conclusió també de que hi ha tants camps d'investigació en el món de l'electrònica (i en qualsevol altre camp) que és difícil centrar la investigació en un punt concret. De fet, és difícil també poder estudiar un aspecte sense haver de posar sota enteniment altres temes que, a priori poden no semblar molt rellevants.

(3) Les simulacions han mostrat com els condensadors, pel fet de sotmetre'ls a tensions cada cop majors, es degraden molt més ràpid, ja que assolixen majors temperatures en un temps menor quan la tensió va augmentant. És d'esperar ja que, un mal ús de l'aparell, com es l'aplicació de tensions fora del seu rang de treball, pot arribar a provocar explosions, evaporació del dielèctric, etc. Totes les propietats dels condensadors, per tant, es veuen afectades per tots aquests aspectes.

(4) Depenent del material, la transferència de calor en un cos es produeix de manera més o menys ràpida. El coure, per exemple, és un bon conductor i la calor es transfereix prou de pressa, mentre que per materials aïllants, com el polipropilè, triga més en portar a terme una transferència de la mateixa calor i, per tant, en augmentar un grau la seva temperatura.

(5) Una altra conclusió important és que la calor es genera a la part més interna de l'aparell i és des d'aquí que es propaga cap a l'exterior. En el nostre cas, es genera des del nucli dissipatiu, arreu de totes les capes. Depenent de les propietats tèrmiques del material, de les estructures internes i dels models de simulació, aquesta transferència és més o menys ràpida.

(6) Les diferències de temperatura entre les solucions dels models unidimensional i bidimensional pot ser a causa de que el terme font, en ambdós casos, pren la mateixa forma i té en compte la totalitat del volum del condensador (en el denominador) i és per això que el model unidimensional resulta en temperatures superiors al bidimensional. Per posar un exemple, injectant la mateixa potència a un fil de coure de radi "r" i a un disc de coure, també de radi "r", en tenir realment menys volum el fil, aquest experimentarà una temperatura superior a la que experimentaria el disc, en distribuir-se més l'energia aplicada, és a dir, la potència.

(7) S'observa també una diferència en ambdós models pel que fa a la temperatura arreu de la capa aïllant. Aquesta diferència potser ve causada pel mateix factor descrit en el paràgraf anterior.

(8) Els perfils de temperatura segueixen una tendència exponencial negativa, decreixent amb el radi. Encara que no segueixi una línia clara, suau i llisa, sinó que es veuen reflectides les capes i subcapas que componen el condensador, es veu perfectament la tendència decreixent. Això, com s'ha exposat en l'apartat d'estudis previs, concorda amb el model obtingut per G. Parler.

(9) Segons els resultats i gràfiques obtinguts que reflecteixen la relació tensió-temperatura màxima, esdevé una tendència exponencial creixent. Tret del cas de tensió de 35 V. Això pot ser a causa de diversos factors, però el més probable és que les condicions en el moment de l'experiment, combinat amb toleràncies del material i possibles errors humans, hagin sigut la causa principal de la sortida de la tendència exponencial dels resultats per a 35 V.

CAPÍTOL 5. ESTUDIS FUTURS

En un món en el que està a l'alça l'elèctric, tota investigació és benvinguda per a fer de cada cop millors els elements elèctrics i electrònics del dia a dia. Des d'una bombeta LED fins a grans pacs de bateries que poden suplir energèticament illes senceres de l'arxipèlag de Hawaii.

Seguint el treball que s'ha realitzat en aquest projecte es poden portar a terme altres estudis com són les simulacions tridimensionals. A partir dels resultats d'aquest projecte, i havent obtingut les conclusions descrites en el capítol 4, es podria caracteritzar el condensador tridimensional, i obtenir resultats encara més precisos. El que s'ha volgut veure amb aquest treball és la tendència i el comportament tèrmic del condensador, i com aquest es degrada, en funció de la tensió que se li apliqui.

Per tant, un model tridimensional, juntament amb el seu estudi d'entropia podrien fer-se, en un futur, a partir del que s'ha vist i comprovat en aquesta memòria.

Es podria aplicar també la mateixa simulació a qualsevol altra geometria, qualsevol altre component electrònic fins i tot bateries de gran tamany. Veure com aquestes reaccionen i es comporten quan treballen en condicions extremes i assoleixen temperatures elevades.

CAPÍTOL 6. BIBLIOGRAFIA I REFERÈNCIES

- [1] <http://electronics.howstuffworks.com/capacitor3.htm>
- [2] https://en.wikipedia.org/wiki/Aluminum_electrolytic_capacitor
- [3] http://ioc.xtec.cat/materials/FP/Materials/0801_IEA/IEA_0801_M10/web/html/WebContent/u1/a3/continguts.html
- [4] https://en.wikipedia.org/wiki/Capacitor_types
- [5] <https://en.wikipedia.org/wiki/Capacitor>
- [6] https://en.wikipedia.org/wiki/Equivalent_series_resistance
- [7] http://iqc.udg.es/~emili/docent/termo/teoria/05_entropia.pdf
- [8] https://en.wikipedia.org/wiki/Heat_transfer
- [9] https://en.wikipedia.org/wiki/Thermal_conduction
- [10] https://es.wikipedia.org/wiki/Conductividad_térmica
- [11] https://es.wikipedia.org/wiki/Calor_específico
- [12] IEEE 1999, Sam G. Parler Jr., "Thermal Modelling of Aluminum Electrolytic Capacitors"
- [13] Romero Sangüesa, R. "TFG – Estudi de l'envelliment de sistemes electrònics"
- [14] https://en.wikipedia.org/wiki/Finite_element_method
- [15] <https://www.comsol.com/multiphysics/finite-element-method>
- [16] https://es.mathworks.com/help/matlab/ref/pdepe.html?searchHighlight=pdepe&s_tid=doc_srchtile, Funció "pdepe"
- [17] <https://es.mathworks.com/help/pde/ug/solvepde.html>, Funció "solvepde"
- [18] <https://es.mathworks.com/matlabcentral/answers/> "centre de preguntes i respostes de MATLAB"
- [19] https://en.wikipedia.org/wiki/Partial_differential_equation

[20] https://en.wikipedia.org/wiki/Condensador_types

[21]

<http://personales.unican.es/rene/doc/Trasp%20WEB/Trasp%20AA/001%20Tran%20Calor%20OK.pdf>

[22] <http://www.mpoweruk.com/thermal.htm>

[23] http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion

[24] Propietats tèrmiques i físiques de l'alumini, òxid d'alumini i paper

Calor específica:

http://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-capacity-d_391.html

Conductivitat tèrmica:

http://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html

Densitat:

http://www.engineeringtoolbox.com/density-materials-d_1652.html

[25] Propietats tèrmiques i físiques del Bor (àcid bòric)

<http://periodictable.com/Elements/005/data.html>

ANNEX A. CODI MATLAB

En aquest annex 2 es reunirà tot el codi informàtic MATLAB que s'ha fet servir per a portar a terme el projecte. Tot separant models unidimensionals i bidimensionals.

Per cada cas, el que s'ha fet és crear funcions informàtiques complertes que, amb altres funcions natives de MATLAB han servit per extreure tota la informació necessària de les dades d'entrada, processar-les i concloure amb l'obtenció de resultats.

ANNEX A.1. CODI MATLAB – MODEL 1D

```
function CondensadorEquacioCalor1D % Function to perform parabolic PDE solver on Fourier's
Heat transfer % equation in one dimension %

clc
close all
clear all

global tinitial
global t40 Temp40 Pot40 tensio corrent
global radi h percent volumD

%% PRIMER REPRESENTEM EL PLOT DEL PERFIL DE TEMPERATURES I POTENCIES DE TOTS ELS
CONDENSADORS
%
% Tenim 4 arxius Excel amb dades dels condensadors

times={};
temperatures={};
potencies={};
arxius={};
tensions={};
corrents={};

z=1;
while(z<=4) % 9 és el nombre d'arxius que tenim

    if(z==1)
        VCC40='33uF_4V_POLSAT_25Vcc.xlsx';
    elseif(z==2)
        VCC40='33uF_4V_POLSAT_30Vcc.xlsx';
    elseif(z==3)
        VCC40='33uF_4V_POLSAT_35Vcc.xlsx';
    elseif(z==4)
        VCC40='33uF_4V_POLSAT_40Vcc.xlsx';
    end

    VCC40D = importdata(VCC40);
    VCC40DD = VCC40D.data;
    VC40DDD=unique(VCC40DD, 'rows');
    assignin('base', 'dades', VC40DDD)

    t40=VC40DDD(:,1);
    Temp40=VC40DDD(:,14);
    Pot40=VC40DDD(:,12);
    tensio=VC40DDD(:,20);
    corrent=VC40DDD(:,10);

    % Busquem els valors no numèrics (NaN) de t40 per eliminar-los i que el codi
    % funcioni correctament

    nan=isnan(t40);

    a=0;
    i=1;
    encontrado=0;
    while(i<=length(t40) && encontrado==0)
        if(nan(i)==1)
            a=i-1;
            encontrado=1;
        end
        i=i+1;
    end

    % Corregim els vectors t40, Temp40 i Pot40 fent servir el
    % mateix valor de a

    if(encontrado==0) % si no hem trobat ningún valor NaN, el vector és el mateix
        t40;
        Temp40;
        Pot40;
        tensio;
        corrent;
    else % si l'hem trobat, ho limitem fins l'últim valor numeric
```

```

t40=t40(1:a);
Temp40=Temp40(1:a);
Pot40=Pot40(1:a);
tensio=tensio(1:a);
corrent=corrent(1:a);
end

times{z}=t40;
temperatures{z}=Temp40;
Pot40(Pot40==0)=0.01;
potencies{z}=Pot40;
[potmax(z),timemaxpotindex]=max(Pot40);
timemax(z)=t40(timemaxpotindex);
tensions{z}=tensio;
corrents{z}=corrent;
arxiu{z}=VCC40;

assignin('base','times',times);
assignin('base','temperatures',temperatures);
assignin('base','potencies',potencies);

z=z+1;
end

potmax
timemax

colordef white

%Un cop hem emplenat les cel·les, respresentem les dades

%Plotegem tots els plots de temps. i potenc. en un mateix gràfic

figure(1);
A=[0 1 0;1 0 1;0 1 1;1 0 0]; % configuració de 4 colors RGB per diferenciar tots els plots
for z=1:4

    hold on
    subplot(2,1,1)
    grid on
    grid minor
    hold on
    plot(times{z},temperatures{z},'color',A(z,:), 'LineWidth',2)
    title({'PERFIL DE TEMPERATURA EXTERNA AL LLARG DEL TEMPS'}, 'FontSize', 24)
    xlabel('Temps (segons)', 'FontSize', 22)
    ylabel('Temperatura (Kelvin)', 'FontSize', 22)
    hold off

    subplot(2,1,2)
    grid on
    grid minor
    hold on
    plot(times{z},potencies{z},'color',A(z,:), 'LineWidth',2)
    title({'PERFIL DE POTÈNCIA DISSIPADA AL LLARG DEL TEMPS'}, 'FontSize', 24)
    xlim([0 350])
    xlabel('Temps (segons)', 'FontSize', 22)
    ylabel('Potència (Watts)', 'FontSize', 22)
    hold off
    hold off

end

%% PASSEM A ANALITZAR ELS ARXIUS PER SEPARAT I OBTENIR EL PERFIL DE TEMPERATURA INTERNA PER
A UNA DISSIPACIÓ DE POTÈNCIA EN EL PUNT INTERIOR

var=input('Introduzca código de archivo: \n\n 1 --> 33uF_4V_POLSAT_25Vcc\n 2 -->
33uF_4V_POLSAT_30Vcc\n 3 --> 33uF_4V_POLSAT_35Vcc\n 4 --> 33uF_4V_POLSAT_40Vcc\n\n');

color=A(var,:);

t40=times{var};
Temp40=temperatures{var};
Pot40=potencies{var};
corrent=corrents{var};
tensio=tensions{var};
arxiu=regexprep(arxiu{var},'_',' '); % eliminar els guions baixos per l'escriptura al
títol del nom de l'arxiu

```

```

% Assignem els vectors a variables que es mostraran en el Workspace
assignin('base','t40',t40);
assignin('base','Temp40',Temp40);
assignin('base','Pot40',Pot40)

% Geometria del condensador

h=0.01;
radi=0.005;

% Geometria de nucli generador de potència
percent=0.9;
volumD=(radi*percent)^2*pi*h;

% Tempepratura Inicial
tinitial = Temp40(1); % intial temp throughout the tile
m = 1; % assume cylindrical symmetry

%% ANÀLISI MULTICAPA

% Es manté l'arxiu però ara se simularà un condensador multicapa. Tenint en
% compte que una capa es considera com Alumini-Dielèctric(Oxid d'alumini)-Paper-Alumini. Se
% simularan un nombre n de capes internes dissipatives, més una capa
% externa aïllant de temperatura simulant el recobriment del condensador per
% a tal funció. Aquesta última capa ocuparà el 10% del radi total.

% Propietats de l'Alumini

global k rho cp

k = 205; % Conductivitat tèrmica de l'Alumini (W/mK)
rho = 2700; % Densitat de l'Alumini (kg/m^3)
cp = 897; % Capacitat calorífica de l'Alumini (J/kgK)

% Propietats del material aïllant tèrmic (Polipropilè)

global kaillant rhoaillant cpaillant

kaillant = 0.17; % Conductivitat tèrmica (W/mK)
rhoaillant = 900; % Densitat (kg/m^3)
cpaillant = 1920; % Capacitat calorífica (J/kgK)

global rhodielectric cpdielectric kdielectric capes

% El material dielèctric és òxid d'alumini

kdielectric=30; % Conductivitat tèrmica en W/mK
rhodielectric=3980; % Densitat en kg/m^3
cpdielectric=718; % Calor específic en J/kgK

global rhopaper cppaper kpaper

% El material espaiador (paper)

kpaper=27.4;
rhopaper=2460;
cppaper=1181;

% Definim un vector de limits entre capes dissipatives, haurem de repartir
% capes fins a un 95%, deixant l'últim 10% a la capa aïllant.

capes=25; % 25 seran les capes de Al-Dielectric-Al del bobinat
DistanciadeCapa=percent*radi/capes; % El % del radi seran les capes d'alumini-dielectric

% cada subcapa estarà composta per 4 parts (Alumini-Oxid-Paper-Alumini)

DistanciaSubcapa=0.25*DistanciadeCapa;

% Ara per a construir el vector global de capes, s'aniran successivament
% sumant aquestes distàncies fins arribar al 90% del radi i llavors
% s'afegeix la capa aïllant

global vectorlimits

vectorlimits=0:DistanciaSubcapa:percent*radi;
vectorlimits=[vectorlimits radi];
assignin('base','vectorlimits',vectorlimits)

% Utilitzarem un vector de coeficients per a indicar el tipus de material
% de què estarà composta la capa. El valor 1 correspondrà a l'alumini, el 2
% a l'oxid d'alumini, el 3 al paper i el 4 a l'aïllant.

```

```

coeficients=[];

i=1;
while(i<=length(vectorlimits))
    coeficients(i)=1;
    coeficients(i+1)=2;
    coeficients(i+2)=3;
    coeficients(i+3)=1;
    i=i+4;
end

% Afegim la última capa d'aïllant com segueix.

coeficients=[coeficients 4];
assignin('base','coeficients',coeficients)

% Definim el vector xmesh per a la discretització.
nodes=300;
xmesh1=linspace(0,radi,nodes);

% Apliquem la funció pdepe amb els paràmetres que pertocuen
sol = pdepe(m, @pdef1, @pdeic1, @pdeb1, xmesh1, t40);
T2 = sol(:,1);
assignin('base','T2',T2)

% Amb la següent línia de codi trobem la màxima temperatura, i ens
% interessarà obtenir la fila en què es troba per a plotejar el perfil de
% temperatures al llarg del radi en un instant de temps determinat (màxima temperatura)

[M3,I3]=max(T2); % M és un vector de temperatures corresponent a les màximes
                % de cada columna de T2 i I és un vector d'índexs que indiquen la fila en
                % què es trobava la màxima
[M4,I4]=max(M3); % busquem el màxim de màxims, l'índex I4 ens donarà la posició en el
                % vector M i per tant també la posició en I i obtindrem la fila que buscavem

filaMaxTemp2=I3(I4);

%===== defines the properties of the PDE function

function[c,f,s] = pdef1(x, t, u, DuDx)

% Hem de localitzar el punt x, en els diferents intervals de vectorlimits,
% per saber quins són els valors que prendran els paràmetres c, f i s.

j=1;
encontrado=0;
while(j<length(vectorlimits) && encontrado==0)

    if(x>=vectorlimits(j) && x<=vectorlimits(j+1))
        % Si el punt x es troba a la capa que estem mirant, hem de saber en
        % quina d'aquestes capes estem i a quin material correspon.

        material=coeficients(j);

        if(x<=percent*radi) % si estem dins el nucli dissipatiu

            % si estem dins del nucli dissipatiu, definim el terme font
            % en funció de la potència instantània i del volum

            potencia=interp1(t40,Pot40,t,'linear','extrap'); % la potència és la total
            % que es dissipa
            s=potencia/volumD;

            if(material==1) % el material 1 és l'alumini

                c=rho*cp;
                f=k*DxDx;

            elseif(material==2) % el material 2 és l'oxid d'alumini

                c=rhodielectric*cpdielectric;
                f=kdielectric*DxDx;

            elseif(material==3) % el material 3 és paper+àcid bòric

                c=rhopaper*cppaper;
                f=kpaper*DxDx;

            end
        end
    end
end

```

```

        else % si estem fora del nucli dissipatiu, directament apliquem propietats de
l'aïllant

            c=rhoaïllant*cpaïllant;
            s=0; % no dissipa potència
            f=kaïllant*DuDx;

        end

        encontrado=1; % ja hem trobat la capa en què es trobava la coordenada x de la
discretització.

        else

            j=j+1; % Si el punt no està a la capa que acabem de mirar, mirem la següent

        end
    end
end
end

% ===== % defines the Initial Conditions
function[u0] = pdeic1(x)
u0 = tinitial;
end

% ===== % defines the Boundary Conditions
function[pl,ql,pr,qr] = pdebc1(xl, ul, xr, ur, t)
%for cylindrical pl and ql are 0, because of symmetry. No flux is present
%at the center of the cilinder.

pl = 0;
ql = 0;
pr = ur-interp1(t40, Temp40, t, 'linear', 'extrap');
qr = 0;

end

%% ANÀLISI D'ENTROPIA

% Definim una matriu de potencia per nodes per a calcular la calor que es
% genera en cada un, repartint equitativament la potència instantània a
% cada un dels nodes dissipatius.

for i=1:length(t40)
    p=Pot40(i)/(nodes*percent);

    for j=1:nodes

        if(j<=nodes*percent) % nucli disipatiu
            P(i,j)=p;
        else % capa externa aïllant
            P(i,j)=0;
        end
    end
end

assignin('base','P',P)

% Es defineix la matriu d'entropia S=P()/T

S=P./T2;
assignin('base','S',S)

figure(2);

surf(xmesh1,t40,S)
set(gca,'fontsize',16)
xlabel('Distància radial (m)','FontSize', 22)
ylabel('Temps (s)','FontSize', 22)
zlabel('Entropia (W/K)','FontSize', 22)
title(sprintf('Solució numèrica d'entropia\nArxiu %s.\n', arxiu),'FontSize', 24)

% Per a la variació d'entropia Srate, per a cada node, trobarem la variació
% temporal Srate=?S/?t
incrt=zeros(length(t40)-1,nodes);
for i=1:length(t40)-1
    incrt(i,:)=t40(i+1)-t40(i);
end

```



```

        incrS(i,:)=S(i+1,:)-S(i,:);
    end

    % Ara obtenim l'entropia acumulada en cada instant de temps

    deltaS(1,:)=S(1,:);
    for i=2:length(t40)
        deltaS(i,:)=deltaS(i-1,:)+S(i,:);
    end

    figure(3);

    surf(xmesh1,t40,deltaS)
    set(gca,'fontsize',16)
    xlabel('Distància radial (m)','FontSize', 22)
    ylabel('Temps (s)','FontSize', 22)
    zlabel('Entropia Acumulada (W/K)','FontSize', 22)
    title(sprintf('Entropia acumulada en la secció\nArxiu %s.\n', arxiu),'FontSize', 24)

    assignin('base','incrt',incrt)
    assignin('base','incrS',incrS)

    Srate=incrS/incrt;

    %% REPRESENTACIÓ DE RESULTATS

    % RESULTATS - MULTICAPA

    % SOLUCIO NUMERICA - SURF

    figure(4);
    grid on
    grid minor
    plot(t40,T2(:,1),'-','color',color,'LineWidth',2);
    hold on
    grid on
    grid minor
    plot(t40,T2(:,end),'o','color',color,'LineWidth',2);
    hold on
    grid on
    grid minor
    plot(t40,Temp40,'+-');
    lgd=legend('Temperatura en x=0','Temperatura en x=R','Condicions de
    Contorn','Location','best');
    lgd.FontSize = 22;
    title(sprintf('PERFIL DE TEMPERATURES EN x=0 i x=R - MULTICAPA.\nArxiu %s.\n',
    arxiu),'FontSize', 24);
    xlabel('Temps (segons)','FontSize', 22);
    ylabel('Temperatura (Kelvin)','FontSize', 22);

    % SOLUCIÓ NUMÈRICA - MULTICAPA - SURF 3D

    figure(5);
    surf(xmesh1,t40,T2);
    title(sprintf('SOLUCIÓ NUMÈRICA - MULTICAPA. Arxiu %s.\n',arxiu),'FontSize', 24);
    xlabel('Distància al centre (m)','FontSize', 22);
    ylabel('Temps (segons)','FontSize', 22);
    zlabel('Temperatura (K)','FontSize', 22);

    % SOLUCIÓ RADIAL EN L'INSTANT DE MÀXIMA TEMPERATURA

    figure(6);

    subplot(1,2,1)
    hold on
    plot(xmesh1,T2(filaMaxTemp2,:),'-','color',color,'LineWidth',2);
    grid on
    grid minor
    lgd=legend(['MULTICAPA (Temperatura Màxima de ' num2str(M4) 'K'],'location','best');
    lgd.FontSize = 22;
    title(sprintf('TEMPERATURA RADIAL EN L'INSTANT DE MÀXIMA TEMPERATURA \n'),'FontSize', 24);
    xlabel('Distància (m)','FontSize', 22);
    ylabel('Temperatura (Kelvin)','FontSize', 22);

    subplot(1,2,2)
    hold on
    plot(xmesh1,T2(filaMaxTemp2,:),'-','color',color,'LineWidth',2);
    grid on
    grid minor
    lgd=legend(['MULTICAPA (Temperatura Màxima de ' num2str(M4) 'K'],'location','best');
    lgd.FontSize = 22;

```

```
title(sprintf('TEMPERATURA RADIAL EN L'INSTANT DE MÀXIMA TEMPERATURA \n'),'FontSize', 24);  
xlabel('Distància (m)','FontSize', 22);  
xlim ([0 radi*percent])  
ylabel('Temperatura (Kelvin)','FontSize', 22);  
  
end
```

ANNEX A.2. CODI MATLAB – MODEL 1D

(COMPARATIVA DE RESULTATS)

```
function CondensadorEquacioCalor1DPerPlotsCombinats % Function to perform parabolic PDE
solver on Fourier's Heat transfer % equation in one dimension %

clc
close all
orient landscape

global tinitial
global t40
global Temp40
global Pot40
global radi h percent volumD

%% PRIMER REPRESENTEM EL PLOT DEL PERFIL DE TEMPERATURES I POTENCIES DE TOTS ELS
CONDENSADORS
%
% Tenim 4 arxius Excel amb dades dels condensadors

times={};
temperatures={};
potencies={};
arxius={};
colors=[0 1 0;1 0 1;0 1 1;1 0 0];

z=1;
while(z<=4) % 9 és el nombre d'arxius que tenim

    if(z==1)
        VCC40='33uF_4V_POLSAT_25Vcc.xlsx';
    elseif(z==2)
        VCC40='33uF_4V_POLSAT_30Vcc.xlsx';
    elseif(z==3)
        VCC40='33uF_4V_POLSAT_35Vcc.xlsx';
    elseif(z==4)
        VCC40='33uF_4V_POLSAT_40Vcc.xlsx';
    end

    VCC40D = importdata(VCC40);
    VCC40DD = VCC40D.data;
    VC40DDD=unique(VCC40DD, 'rows');

    t40=VC40DDD(:,1);
    Temp40=VC40DDD(:,14);
    Pot40=VC40DDD(:,12);

    % Busquem els valors no numèrics (NaN) de t40 per eliminar-los i que el codi
    % funcioni correctament

    nan=isnan(t40);

    a=0;
    i=1;
    encontrado=0;
    while(i<=length(t40) && encontrado==0)
        if(nan(i)==1)
            a=i-1;
            encontrado=1;
        end
        i=i+1;
    end

    % Corregim els vectors t40, Temp40 i Pot40 fent servir el
    % mateix valor de a

    if(encontrado==0) % si no hem trobat ningun valor NaN, el vector és el mateix
        t40;
        Temp40;
        Pot40;
    else % si l'hem trobat, ho limitem fins l'ultim valor numeric
        t40=t40(1:a);
        Temp40=Temp40(1:a);
    end
end
```

```

Pot40=Pot40(1:a);
end

times{z}=t40;
temperatures{z}=Temp40;
Pot40(Pot40==0)=0.01;
potencies{z}=Pot40;
arxiu{z}=VCC40;

assignin('base','times',times);
assignin('base','temperatures',temperatures);
assignin('base','potencies',potencies);

z=z+1;
end

%Un cop hem emplenat les cel·les, representem les dades

%Plotegem tots els plots de temps. i potenc. en un mateix gràfic

for z=1:4

    hold on
    subplot(2,1,1)
    grid on
    grid minor
    hold on
    plot(times{z},temperatures{z},'color',colors(z,:), 'LineWidth',2)
    title({'PERFIL DE TEMPERATURA EXTERNA AL LLARG DEL TEMPS'}, 'FontSize', 18)
    legendInfo1{z} = ['Arxiu ' regexprep(arxiu{z},'_',' ') ];
    lgd1=legend(legendInfo1);
    lgd1.FontSize=16;
    xlabel('Temps (segons)', 'FontSize', 16)
    ylabel('Temperatura (Kelvin)', 'FontSize', 16)
    hold off

    subplot(2,1,2)
    grid on
    grid minor
    hold on
    plot(times{z},potencies{z},'color',colors(z,:), 'LineWidth',2)
    title({'PERFIL DE POTENCIA DISSIPADA AL LLARG DEL TEMPS'}, 'FontSize', 18)
    legendInfo2{z} = ['Arxiu ' regexprep(arxiu{z},'_',' ') ];
    lgd2=legend(legendInfo2);
    lgd2.FontSize=16;
    xlim([0 350])
    xlabel('Temps (segons)', 'FontSize', 16)
    ylabel('Potència (Watts)', 'FontSize', 16)
    hold off
    hold off

end

%% PASSEM A ANALITZAR ELS ARXIUS PER SEPARAT I OBTENIR ELS PERFILS DE TEMPERATURA

for var=1:4

    t40=times{var};
    Temp40=temperatures{var};
    Pot40=potencies{var};
    arxiu=regexprep(arxiu{var},'_',' '); % eliminar els guions baixos per l'escriptura al
títol del nom de l'arxiu

    % Assignem els vectors a variables que es mostraran en el Workspace
    assignin('base','t40',t40);
    assignin('base','Temp40',Temp40);
    assignin('base','Pot40',Pot40)

    % Propietats de l'Alumini

    global k rho cp

    k = 205; % Conductivitat tèrmica de l'Alumini (W/mK)
    rho = 2700; % Densitat de l'Alumini (kg/m^3)
    cp = 897; % Capacitat calorífica de l'Alumini (J/kgK)

    % Propietats del material aïllant tèrmic (Grafit)

    global kaillat rhoaillat cpaillat

    kaillat = 0.17; % Conductivitat tèrmica del grafit (W/mK)

```

```

rhoaillant = 900; % Densitat del grafit (kg/m^3)
cpaillant = 1920; % Capacitat calorifica del grafit (J/kgK)

% Geometria del condensador

h=0.01;
radi=0.005;

% Geometria de nucli generador de potència
percent=0.9;
volumD=(radi*percent)^2*pi*h;

% Temperatura Inicial
tinitial = Temp40(1); % intial temp throughout the tile
m = 1; % assume cylindrical symmetry

%% ANÀLISI MULTICAPA

% Es manté l'arxiu però ara se simularà un condensador multicapa. Tenint en
% compte que una capa es considera com Alumini-Dielèctric-Alumini. Se
% simularan un nombre n de capes internes dissipatives, més una capa
% externa aïllant de temperatura simulant el recobriment del condensador per
% a tal funció. Aquesta última capa ocuparà el 10% del radi total.

global rhodielectric cpdielectric kdielectric capes

% El material dielèctric és paper xop en electròlit

kdielectric=30; % Conductivitat tèrmica del paper en electròlit en W/mK
rhodielectric=3980; % Densitat del paper dielèctric en kg/m^3
cpdielectric=718; % Calor específic del paper dielèctric en J/kgK

global rhopaper cppaper kpaper

% El material espaiador (paper)

kpaper=27.4;
rhopaper=2460;
cppaper=1181;

% Definim un vector de límits entre capes dissipatives, haurem de repartir
% capes fins a un 90%, deixant l'últim 10% a la capa aïllant. Considerant
% cada capa com un 25% Alumini 50% Dielèctric i 25% Alumini. Aquest vector
% servirà per definir els coeficients de la PDE c, f i s més endavant en la
% funció @pdef1.

% Cada capa ocuparà el 90% del radi dividit entre el nombre de capes, això
% és:

capes=25; % 25 seran les capes de Al-Dielectric-Al del bobinat
DistanciadeCapa=percent*radi/capes; % El 90% del radi seran les capes d'alumini-dielectric

% cada subcapa estarà composta per 4 parts (Alumini-Oxid-Paper-Alumini)

DistanciaSubcapa=0.25*DistanciadeCapa;

% Ara per a construir el vector global de capes, s'aniran successivament
% sumant aquestes distàncies fins arribar al 90% del radi i llavors
% s'afegeix la capa aïllant

global vectorlimits

vectorlimits=0:DistanciaSubcapa:percent*radi;
vectorlimits=[vectorlimits radi];
assignin('base','vectorlimits',vectorlimits)

% Utilitzarem un vector de coeficients per a indicar el tipus de material
% de què estarà composta la capa. El valor 1 correspondrà a l'alumini, el 2
% a l'oxid d'alumini, el 3 al paper i el 4 a l'aïllant.

coeficients=[];

i=1;
while(i<=length(vectorlimits))
    coeficients(i)=1;
    coeficients(i+1)=2;
    coeficients(i+2)=3;
    coeficients(i+3)=1;
    i=i+4;

```

```

end

% Afegim la última capa d'aïllant com segueix.

coeficients=[coeficients 4];

% Definim el vector xmesh per a la discretització.
xmesh1=linspace(0,radi,300);

% Apliquem la funció pdepe amb els paràmetres que pertocuen
sol = pdepe(m, @pdef1, @pdeic1, @pdebc1, xmesh1, t40);
T2 = sol(:,1);
assignin('base','T2',T2)

% Busquem la màxima temperatura
Tmax=max(max(T2));

% Busquem l'instant en què es dóna aquesta màxima temperatura, sabent que es
% dóna en el punt central (T2(:,1))

i=1;
encontrado=0;
while(i<=length(T2(:,1)) && encontrado==0)

    if(T2(i,1)==Tmax)
        encontrado=1;
        instantTmax(var)=t40(i);
        indexinstantTmax(var)=i;
    else
        i=i+1;
    end
end

TemperaturesMax(var)=Tmax; % vector que mostra la Tmax per cada arxiu (tensió)
assignin('base','Tmax',TemperaturesMax)

perfils{var}=T2(indexinstantTmax(var),:); % dóna el perfil de Tª radial en instant de Tmax
assignin('base','TradialTmax',perfils)

perfilsinterna{var}=T2(:,1); % dóna el perfil de Tª interna en el temps
assignin('base','Tsinternes',perfilsinterna)

nomsarxius{var}=arxiu;

end

%=====defines the properties of the PDE function

function[c,f,s] = pdef1(x, t, u, DuDx)

% Hem de localitzar el punt x, en els diferents intervals de vectorlimits,
% per saber quins són els valors que prendran els paràmetres c, f i s.

j=1;
encontrado=0;
while(j<length(vectorlimits) && encontrado==0)

    if(x>=vectorlimits(j) && x<=vectorlimits(j+1))
        % Si el punt x es troba a la capa que estem mirant, hem de saber en
        % quina d'aquestes capes estem i a quin material correspon.

        material=coeficients(j);

        if(x<=percent*radi) % si estem dins el nucli dissipatiu

            % si estem dins del nucli dissipatiu, definim el terme font
            % en funció de la potència instantània i del volum

            potencia=interp1(t40,Pot40,t,'linear','extrap'); % la potència és la total
            que es dissipa
            s=potencia/volumD;

            if(material==1) % el material 1 és l'alumini

                c=rho*cp;
                f=k*DuDx;

            elseif(material==2) % el material 2 és l'oxid d'alumini

```

```

        c=rhodielectric*cpdielectric;
        f=kdielectric*DuDx;

elseif(material==3) % el material 3 és paper+àcid bòric

        c=rhopaper*cppaper;
        f=kpaper*DuDx;

    end

    else % si estem fora del nucli dissipatiu, directament apliquem propietats de
l'aïllant

        c=rhoaïllant*cpaïllant;
        s=0; % no dissipa potència
        f=kaïllant*DuDx;

    end

    encontrado=1; % ja hem trobat la capa en què es trobava la coordenada x de la
discretització.

    else

        j=j+1; % Si el punt no està a la capa que acabem de mirar, mirem la següent

    end

end

end

% ===== % defines the Initial Conditions

function[u0] = pdeic1(x)
u0 = tinitial;
end

% ===== % defines the Boundary Conditions

function[pl,ql,pr,qr] = pdebc1(xl, ul, xr, ur, t)
%for cylindrical pl and ql are 0, because of symmetry. No flux is present
%at the center of the cilinder.

pl = 0;
ql = 0;
pr = ur-interp1(t40, Temp40, t, 'linear', 'extrap');
qr = 0;

end

%% PLOT RELACIÓ TENSIÓ-TEMP. MAXIMA

tensions=[25 30 35 40];
assignin('base','Tensions',tensions)

figure;
hold on;
grid on
grid minor
f = fit(tensions, TemperaturesMax, 'smoothingspline', 'SmoothingParam', 0.03);
plot(f, tensions, TemperaturesMax)
plot(tensions, TemperaturesMax, 'co-', 'LineWidth', 2);
title({'TEMPERATURES MÀXIMES ASSOLIDES VS TENSIÓ APLICADA'; '(-Línia de tendència
exponencial-)'}, 'FontSize', 24);
xlabel('Tensions Vcc (V)', 'FontSize', 16);
ylabel('Temperatura (Kelvin)', 'FontSize', 16);
hold off;

%% PLOT CONJUNT DELS PERFILS DE TEMPERATURES EN INSTANTS DE MÀXIMA TEMPERATURA

figure;
for i=1:4
    hold on;
    plot(xmesh1, perfils{i}, 'color', colors(i,:), 'LineWidth', 2)
    grid on
    grid minor
    title({'PERFILS DE TEMPERATURA PER A CADA ARXIU'; 'Instant de màxima
temperatura'}, 'FontSize', 24);
    legendInfo{i} = ['Arxiu' nomsarxius{i} ' - Temperatura Màxima de '

```

```

num2str(TemperaturesMax(i)) 'K - Instant de temps t = ' num2str(instantTmax(i)) 's'];
lgd=legend(legendInfo);
lgd.FontSize=22;
xlim ([0 radi*percent])
xlabel('Distància (m)','FontSize', 16);
ylabel('Temperatura (Kelvin)','FontSize', 16);
end
hold off;

%% PLOT CONJUNT DE PERFILS DE TEMPERATURES INTERNES AL LLARG DEL TEMPS

figure;
for i=1:4
    hold on;
    plot(times{i},perfilsinterna{i},'color',colors(i,:), 'LineWidth',2)
    grid on
    grid minor
    title({'PERFILS DE TEMPERATURA PER A CADA ARXIU'; 'Temperatura interna al llarg del
temps'}, 'FontSize', 24);
    legendInfo{i} = ['Arxiu' nomsarxius{i} ' - Temperatura màxima de '
num2str(TemperaturesMax(i)) 'K'];
    lgd=legend(legendInfo);
    lgd.FontSize=22;
    xlabel('Temps (s)','FontSize', 16);
    ylabel('Temperatura (Kelvin)','FontSize', 16);
end
hold off;

end

```


ANNEX A.3. CODI MATLAB – MODEL 2D

```
function CondensadorEquacioCalor2D

clc
close all

% TEMPERATURE DIFUSSION IN 2D (CORE DISSIPATION)

var=input('Introduzca código de archivo: \n\n 1 --> 33uF_4V_POLSAT_25Vcc\n 2 --> 33uF_4V_POLSAT_30Vcc\n 3 --> 33uF_4V_POLSAT_35Vcc\n 4 --> 33uF_4V_POLSAT_40Vcc\n\n');

i=1;
encontrado=0;
while(encontrado==0)

    if(var~=1&&var~=2&&var~=3&&var~=4)
        var=input('Error con el código de archivo, vuelva a introducir el código:\n\n');
    else
        if(var==1)
            VCC40='33uF_4V_POLSAT_25Vcc.xlsx';
        elseif(var==2)
            VCC40='33uF_4V_POLSAT_30Vcc.xlsx';
        elseif(var==3)
            VCC40='33uF_4V_POLSAT_35Vcc.xlsx';
        elseif(var==4)
            VCC40='33uF_4V_POLSAT_40Vcc.xlsx';
        end
        encontrado=1;
    end

    i=i+1;

end % Obtenim l'arxiu d'interés

% Extreiem les dades de l'arxiu
VCC40D = importdata(VCC40);
VCC40DD = VCC40D.data;
VC40DDD=unique(VCC40DD,'rows');

global t40 Temp40 Pot40 arxiu

t40=VC40DDD(:,1);
Temp40=VC40DDD(:,14);
Pot40=VC40DDD(:,12);
arxiu=regexprep(VCC40,'_',' ');

% busquem els valors no numèrics (NaN) de t40 per eliminar-los

nan=isnan(t40);

a=0;
i=1;
encontrado=0;
while(i<=length(t40) && encontrado==0)
    if(nan(i)==1)
        a=i;
        encontrado=1;
    end
    i=i+1;
end

% corregim els vectors t40, Temp40 i Pot40 fent servir el
% mateix valor de a

if(encontrado==0) % si no hem trobat ningún valor NaN, el vector és el mateix
    t40;
    Temp40;
    Pot40;
else % si l'hem trobat, ho limitem fins l'últim valor numeric
    t40=t40(1:a-1);
    Temp40=Temp40(1:a-1);
    Pot40=Pot40(1:a-1);
end
```

```

% qualsevol valor de potència igual a 0 se substitueix per un valor positiu
% (proper a zero) per a no tenir valors nuls.
Pot40(Pot40==0)=0.01;

assignin('base','t40',t40);
assignin('base','Temp40',Temp40);
assignin('base','Pot40',Pot40);

% PROPIETATS DELS MATERIALS

% Alumini

global rho cp k

k=205;
rho=2700;
cp=897;

% Aïllant (grafit)

global rhoaillant cpaillant kaillant

kaillant = 0.17;
rhoaillant = 900;
cpaillant = 1920;

global rhodielectric cpdielectric kdielectric

% El material dielèctric és òxid d'alumini

kdielectric=30; % Conductivitat tèrmica en W/mK
rhodielectric=3980; % Densitat en kg/m^3
cpdielectric=718; % Calor específic en J/kgK

% El material espaiador (paper xop en electròlit)

global rhopaper cppaper kpaper

kpaper=27.4;
rhopaper=2460;
cppaper=1181;

% TEMPERATURA INICIAL

Tinitial=Temp40(1);

% GEOMETRIA DEL CONDENSADOR

global radi h percent volumD

percent=0.9;
radi=0.005; % radi = 5 mm
h=0.01; % altura = 1 cm
volumD=(percent*radi)^2*pi*h; % volum que dissipa potència

%% CONDENSADOR MULTICAPA 2D

% VARIABLES GLOBALES DEL CONDENSADOR MULTICAPA

global nodes2 capes

capes=25;
DistanciadeCapa=0.9*radi/capes; % El 90% del radi seran les capes d'alumini-dielectric

% cada subcapa estarà composta per 4 parts (Alumini-Oxid-Paper-Alumini)

DistanciaSubcapa=0.25*DistanciadeCapa;

% Ara per a construir el vector global de capes, s'aniran successivament
% sumant aquestes distàncies fins arribar al 90% del radi i llavors
% s'afegeix la capa aïllant

global vectorlimits

vectorlimits=0:DistanciaSubcapa:percent*radi;
vectorlimits=[vectorlimits radi];
assignin('base','vectorlimits',vectorlimits)

% Utilitzarem un vector de coeficients per a indicar el tipus de material
% de què estarà composta la capa. El valor 1 correspondrà a l'alumini, el 2

```

```

% a l'oxid d'alumini, el 3 al paper i el 4 a l'aïllant.

coeficients=[];

i=1;
while(i<=length(vectorlimits))
    coeficients(i)=1;
    coeficients(i+1)=2;
    coeficients(i+2)=3;
    coeficients(i+3)=1;
    i=i+4;
end

% Afegim la última capa d'aïllant com segueix.

coeficients=[coeficients 4];

% GEOMETRIA - CERCLE UNIC (Es tindran en compte les capes en la funció del coeficient del
terme font i altres coeficients de la PDE)

R1=[1;0;0;radi]; % contorn exterior circular de radi
gd = R1;
sf = 'R1';
ns = char('R1');
g = decsg(gd,sf,ns);

% MODEL DE PDE

numberOfPDE = 1;
pdem2 = createpde(numberOfPDE);
geometryFromEdges(pdem2,g);

% DEFINICIÓ DE LA MALLA

msh = generateMesh(pdem2,'Hmax',(radi/capes)*0.5); % longitud màxima dels segments de la
malla Hmax
nodes2=msh.Nodes;

figure;
hold on;
pdegplot(pdem2);
title 'REPRESENTACIÓ DE LA "MESH" PER AL MEF'
ylabel 'Coordenada Y de la secció (m)'
xlabel 'Coordenada X de la secció (m)'
hold off;

plus=0.2*radi; % afegim un marge al plot
axis([-radi-plus radi+plus -radi-plus radi+plus]);

pdemesh(pdem2);
axis equal
assignin('base','nodes',nodes2);

figure
pdegplot(pdem2,'EdgeLabels','on','FaceLabels','on')
axis([-radi-plus radi+plus -radi-plus radi+plus]);
axis equal
title 'REPRESENTACIÓ DE LA "MESH" PER AL MEF'
ylabel 'Coordenada Y de la secció (m)'
xlabel 'Coordenada X de la secció (m)'

% FRAMES A ANALITZAR (temps a discretitzar)
nframes = length(t40);
tlist = t40;

% CONDICIONS INICIALS
setInitialConditions(pdem2,Tinitial);

% CONDICIONS DE CONTORN
bcfun = @(region,state) interp1(t40,Temp40,state.time,'linear','extrap');
applyBoundaryCondition(pdem2,'dirichlet','Edge',1:4,'u',bcfun);

% ESPECIFICACIÓ DE COEFICIENTS PER A LA PDE
specifyCoefficients(pdem2,'m',0,'d', @dcoeff,'c', @ccoeff,'a',0,'f', @fcoeff);

% Coeficient f (terme font)
function f=fcoeff(region,state)

    l=length(region.x);
    f=zeros(1,l);

```

```

for p=1:l
    a=hypot(region.x(p),region.y(p)); % distance to the centre of the node
    % Let's check in which layer these distances are.
    j=1;
    found=0;
    while(j<length(vectorlimits) && found==0)
        if(a>=vectorlimits(j) && a<=vectorlimits(j+1))

            % Si el punt x es troba a la capa que estem mirant, hem de saber en
            % quina d'aquestes capes estem i a quin material correspon.

            material=coeficients(j);

            if(material~=4) % L'unic material que no dissiparà potència és l'aïllant
extern
                potencia=interp1(t40,Pot40,state.time,'linear','extrap'); % la potencia
és la total que es dissipa
                % en aquest moment, entre 25 capes i entre (3) subcapes d'alumini(2) i
oxid(1)

                f(1,p)=potencia/volumD;

            else

                f(1,p)=0;

            end

            found=1;

        else

            j=j+1; % Si el punt no està a la capa que acabem de mirar, mirem la següent

        end

    end

end

end

% Coeficient d (rho*cp)
function d=dcoeff(region,state)

l=length(region.x);
d=zeros(1,l);

for q=1:l

    a=hypot(region.x(q),region.y(q)); % distance to the centre of all nodes
    % Let's check in which layer these distances are.
    j=1;
    found=0;
    while(j<length(vectorlimits) && found==0)

        if(a>=vectorlimits(j) && a<=vectorlimits(j+1))

            % Si el punt a es troba a la capa que estem mirant, hem de saber en
            % quina d'aquestes capes estem i a quin material correspon.

            material=coeficients(j);

            if(material==1) % el material 1 és l'alumini (dissipa potència)

                d(1,q)=rho*cp;

            elseif(material==2) % el material 2 és l'oxid d'alumini

                d(1,q)=rhodielectric*cpdielectric;

            elseif(material==3) % el material 3 és paper

                d(1,q)=rhopaper*cppaper;

            elseif(material==4) % el material 4 és aïllant (Polipropilè, PP)

```

```

        d(1,q)=rhoaillant*cpaillant;

    end

    found=1;
else
    j=j+1;
end

end

end
end

% Coeficient c (rho*cp)
function c=ccoeff(region,state)

l=length(region.x);
c=zeros(1,l);

for r=1:l

    a=hypot(region.x(r),region.y(r)); % distance to the centre of all nodes
    % Let's check in which layer these distances are.
    j=1;
    found=0;
    while(j<length(vectorlimits) && found==0)

        if(a>vectorlimits(j) && a<=vectorlimits(j+1))

            % Si el punt a es troba a la capa que estem mirant, hem de saber en
            % quina d'aquestes capes estem i a quin material correspon.

            material=coeficients(j);

            if(material==1) % el material 1 és l'alumini (dissipa potència)

                c(1,r)=k;

            elseif(material==2) % el material 2 és l'oxid d'alumini

                c(1,r)=kdielectric;

            elseif(material==3) % el material 3 és paper

                c(1,r)=kpaper;

            elseif(material==4) % el material 4 és aïllant (Polipropilè, PP)

                c(1,r)=kaillant;

            end

            found=1;
        else
            j=j+1;
        end
    end

end

end

end

% SOLUCIÓ NUMÈRICA

pdem2.SolverOptions.ReportStatistics ='on';
result2 = solvepde(pdem2,tlist);
T2 = result2.NodalSolution;
assignin('base','Temperatures',T2);

%% PLOT 2D - SOLUCIÓ NUMÈRICA

% Busquem l'isntant de temperatura maxima

[M,I]=max(T2); % M és un vector de Tmax per a cada instant t i I és un vector d'índexs
corresponent a les files en que s'ha trobat la Tmax.
[M2,I2]=max(M); % M2 és la Tmax màxima i I2 és l'index final (instant)

instTmax=I(I2); % t40(instTmax) és el temps en que es dona la màxima temperatura

```

```
Tmax=M2; % minima T en l'instant de màxima temp
Tmin=min(T2(:,instTmax)); % maxima T en l'instant de màxima temp

figure;
grid on
grid minor
pdeplot(pdem2,'XYData',T2(:,instTmax),'ZData',T2(:,instTmax),'FaceAlpha',1,'Mesh','on');
axis([-radi-plus radi+plus -radi-plus radi+plus Tmin Tmax]);
xlabel('Direcció X (m)','FontSize', 16);
ylabel('Direcció Y (m)','FontSize', 16);
zlabel('Temperatura (K)','FontSize', 16);
title(sprintf('SOLUCIÓ NUMÉRICA 2D - TEMPERATURA A LA SECCIÓ\nArxiu %s.',arxiu),'FontSize',
24)

end
```

